KWARTALNIK TELEKOMUNIKACYJNY

CZASOPISMO

WYDAWANE PRZEZ SEKCJĘ TELEKOMUNIKACYJNĄ STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH
przy poparciu
MINISTERSTWA POCZT i TELEGRAFÓW oraz MINISTERSTWA KOMUNIKACJI

Nr 1-2
1949

ROK 12 (6) ŚTYCZEŃ – CZERWIEC Nr 1–2

KWARTALNIK TELEKOMUNIKACYJNY

CZASOPISMO

WYDAWANE PRZEZ SEKCJĘ TELEKOMUNIKACYJNĄ STOWARZYSZENIA ELEKTRYKÓW POLSKICH
przy poparciu
MINISTERSTWA POCZT i TELEGRAFÓW oraz MINISTERSTWA KOMUNIKACJI

TREŚĆ Nr 1–2

PROF. DR INŻ. JANUSZ GROSZKOWSKI
Zakład Radiotechniki Politechniki Warszawskiej

O najkorzystniejszych warunkach pracy wakumetru oporowego

STRESZCZENIE

Autor rozważa najkorzystniejsze warunki pracy wakumetru przewodnościowego, typu oporowego w układzie stałego prądu. Ustaliwszy równanie wakumetru, tj. zależność napięcia na zaciskach głowicy oporowej od ciśnienia, znajduje wyrażenie na czułość wakumetru, a następnie określa warunki największej czułości w zależności od danych głowicy dla różnych zakresów ciśnień. Okazuje się, że dla danej głowicy (materiał drutu oporowego, średnica drutu) istnieje temperatura (a więc i natężenie prądu) najkorzystniejsza dla danego zakresu ciśnienia. W zakończeniu podano przykład liczbowy oparty na wynikach doświadczalnych, potwierdzających powyższe rozważania.

On the optimum operating conditions of a resistance type vacuum gauge

J. Groszkowski (Radio Institute, Technical University, Warszawa).

SUMMARY

The paper considers the optimum operating conditions of the resistance type conductivity vacuum gauge in the constant current circuit. Having established the principal vacuum gauge equation, i. e. „the voltage across the resistance of the vacuum gauge head v. the vacuum pressure", the author finds the expression for the sensitivity of the vacuum gauge as well as the conditions for the maximum sensitivity as function of the head's data for the different pressure ranges. It is shown that for a given head (resistance wire material and wire diameter) there is the temperature and consequently the heating current which are most effective for the given pressure range. Finally, as the confirmation of the above considerations, an example based on the experimental results is given.

1. Wstęp

Działanie wakumetrów przewodnościowych opiera się na zależności cieplnej przewodności gazów lub par od ciśnienia. Zależność ta występuje wyraźnie dopiero w zakresie niskich ciśnień; w zakresie natomiast ciśnień większych, bliskich do normalnego, przewodność cieplna gazu jest niezależna od ciśnienia. Tutaj bowiem średnia droga swobodna jest mniejsza od wymiarów naczynia, a przeto, np. z ubywaniem molekuł, tzn. z obniżaniem ciśnienia, rośnie równocześnie ich droga swobodna, dzięki czemu skuteczność odprowadzania ciepła nie ulega zmianie.

W zakresie wyższych ciśnień przewodność cieplna gazu może być — jak wiadomo — wyrażona wzorem

$$k = \varepsilon \, c_v \, \eta \qquad (1.1)$$

gdzie ε jest współczynnikiem, wynoszącym:
dla gazów jednoatomowych 2,6,
dla gazów dwuatomowych 1,9.
c_v jest molekularnym ciepłem właściwym przy stałej objętości.
η — lepkością gazu.

Ponieważ współczynnik lepkości η nie zależy tu od ciśnienia, molekularne ciepło właściwe ma zaś wartość stałą, przeto w zakresie ciśnień niezbyt niskich przewodność k będzie niezależna od ciśnienia.

W tablicy 1 podano wartości przewodności (w kal/cm. sek.^{0}C) dla niektórych gazów i par w temperaturze 0^{0}C.

TABLICA 1

G a z	k $\frac{\text{kal}}{\text{cm. sek. }^0\text{C}}$	λ_0 (cm)
Argon	41	8,1
Azot	52	6,9
Dwutlenek węgla	34	3,2
Hel	336	12,9
Neon	109	10,9
Powietrze	57	5
Rtęć (200^0)	19	6,7
Tlen	56	8,1
Woda		4,3
Wodor	327	3

Przy niskich ciśnieniach średnia długość drogi swobodnej staje się większa od odległości między elementem chłodzonym a ścianami naczynia. Ponieważ w tych warunkach ilość zdarzeń między samymi molekułami jest znikoma, lepkość gazu przestaje tu niejako występować, a przewodzenie odbywa się dzięki przenoszeniu ciepła przez bezpośredni ruch molekuł między elementem stygnącym a ścianami naczynia. Zatem przewodność cieplna będzie tu proporcjonalna do ilości molekuł, a więc do ciśnienia gazu.

O tym, jaki rodzaj przewodności będzie przeważał: niezależny czy zależny od ciśnienia — decyduje stosunek długości drogi swobodnej molekuł gazu do odległości elementu stygnącego od ścian naczynia, czyli do wymiarów naczynia próżniowego (głowicy wakumetrycznej).

W tablicy 1 podano wartości średniej drogi swobodnej λ_0 (w cm) molekuł gazów przy ciśnieniu 1 mTr $= 10^{-3}$ Tr (1 Tr $=$ 1 tor $=$ $=$ 1 mmHg) w temperaturze 20^{0}C.

Średnią drogę swobodną dla innego ciśnienia p (Tr) obliczamy z zależności

$$\lambda_p = \lambda_0 \frac{10^{-3}}{p} \qquad (1.2)$$

Przyjmując promień cylindrycznej głowicy wakumetru równy 1 cm, otrzymamy z warunku $\lambda_p > 1$ równanie

$$p < \lambda_0 . 10^{-3} .$$

Dla powietrza oraz gazów o zbliżonych wartościach λ_0 możemy napisać

$$p < 5.10^{-3} .$$

Wynika stąd, że dla ciśnień rzędu militorów możemy uważać, że przewodzenie ciepła jest natury czysto molekularnej i jest ściśle proporcjonalne do ciśnienia, podczas gdy dla ciśnień większych będzie ono stopniowo przechodzić w przewodzenie charakteru konwekcyjnego, a więc coraz bardziej stawać się niezależne od ciśnienia.

W ten sposób przydatność zasady wykorzystania przewodności cieplnej gazów do pomiarów ciśnień będzie coraz mniejsza w miarę zbliżania się do ciśnień normalnych.

Czułość wakumetrów przewodnościowych jest zależna od rodzaju gazu lub pary; będzie ona większa dla gazów o większej przewodności cieplnej (np. wodoru lub helu), mniejsza zaś dla gazów o mniejszej przewodności (np. powietrza, dwutlenku węgla).

Skalowanie wakumetrów przewodnościowych winno być więc przeprowadzane dla tego gazu lub pary, dla którego ma być stosowany wakumetr.

Zmianę przewodności cieplnej gazu w wakumetrze przewodnościowym określa się przez obserwowanie stopnia stygnięcia jakiegoś elementu materialnego, umieszczonego w głowicy wakumetru, połączonej z przestrzenią o mierzonym ciśnieniu.

Stopień stygnięcia może być obserwowany bądź przez określanie temperatury, jaką wskazuje element przy stałej ilości doprowadzanego do niego ciepła, bądź przez określanie ilości ciepła, jaka jest potrzebna do uzyskania zawsze tej samej temperatury. Miarą ilości ciepła jest zazwyczaj wielkość energii elektrycznej, doprowadzanej do stygnącego elementu. Określanie temperatury odbywa się bądź przez pomiar oporności elektrycznej danego elementu, bądź przez pomiar siły elektromotorycznej, która powstaje w stykającej się z danym elementem parze termoelektrycznej.

W ten sposób będziemy rozróżniać wakumetry oporowe oraz termoelektryczne.

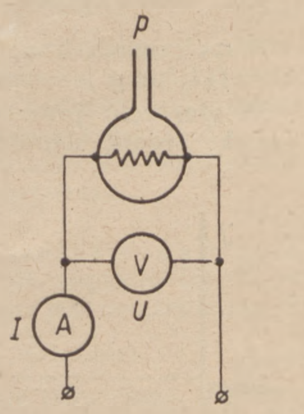
Tematem najbliższych rozważań będą wakumetry oporowe.

2. Wakumetry oporowe

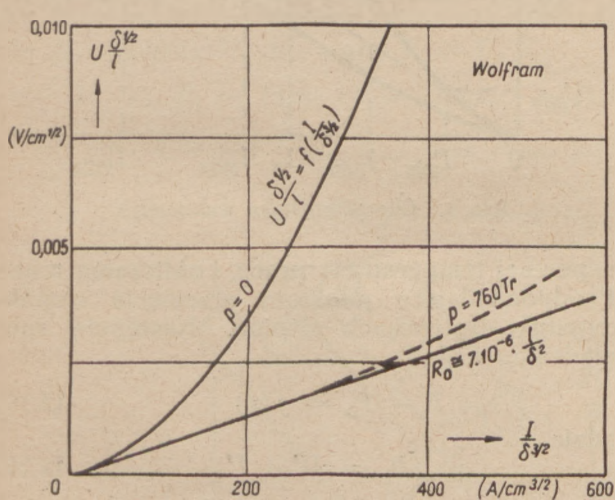
2.1. Wakumetr i jego charakterystyki

W wakumetrach oporowych elementem, który służy do stwierdzenia zmian przewodności cieplnej gazu rozrzedzonego w zależności od zmian ciśnienia, jest opór sporządzony z metalu o możliwie dużym cieplnym współczynniku oporności właściwej. Umieszczony w bańce, połączonej z przestrzenią o mierzonym ciśnieniu, opór taki może służyć równocześnie za źródło energii cieplnej oraz za miernik temperatury.

Charakterystykami wakumetru oporowego będziemy nazywać krzywe zależności napięcia U od prądu I, otrzymane w układzie jak na rys. 1, przy czym parametrem jest ciśnienie p (rys. 2). Dla ciśnienia $p = 0$ krzywa przebiega najwyżej, dla ciśnienia $p = 760$ Tr — najniżej. Wszystkie te krzywe są styczne w początku układu współrzędnych do prostej R_0, odpowiadającej oporności elementu oporowego w temperaturze otoczenia (np. 20°C). Przy pewnym ciśnieniu p, danemu prądowi I odpowiada pewne napięcie U. Oporność elementu



Rys. 1. Układ pomiarowy wakumetru oporowego.



Rys. 2. Charakterystyki wakumetru oporowego.

oporowego wynosi oczywiście

$$R = \frac{U}{I}.$$

Stosunek $R : R_0$ jest miarą temperatury elementu, a wyrażenie UI jest miarą doprowadzanego ciepła.

2.2. Równanie wakumetru

Energia elektryczna, doprowadzana do elementu grzejnego jako moc P (W), zamienia się w nim na ciepło, które odpływa do otoczenia trzema drogami: przez promieniowanie, przez przewodzenie gazu (lub pary) o mierzonym ciśnieniu oraz przez przewodzenie do zamocowań. Jeśli dla elementu grzejnego w kształcie drutu o średnicy δ i długości l (dostatecznie dużej wobec δ), straty na przewodzenie do zamocowań mogą być pomijane, możemy wówczas napisać równanie:

$$P = s\,F\,(T,\ T_z) + s\,\Phi_{(p)}\,(T - T_z) \qquad (2.1)$$

gdzie

$s = \pi\,\delta\,l$ jest powierzchnią elementu grzejnego w cm^2,

F jest funkcją, wyrażająca promieniowanie drucika do otoczenia,

T i T_z są temperaturami bezwzględnymi odpowiednio elementu grzejnego oraz otoczenia (w °K),

$\Phi_{(p)}$ jest funkcją, wyrażającą zależność przewodności cieplnej gazu od ciśnienia p.

Kształt funkcji F może być — jak wiadomo — przyjęty jako

$$F = e\,\Psi\,(T^4 - T^4) = a\,(T^4 - T_z^4) \qquad (2.2)$$

gdzie $\psi = 5{,}73.10^{-12}$ W/cm^2 °K^4 jest stałą uniwersalną Stefan'a-Boltzman'a,

e — współczynnikiem promieniowania, odniesionym do promieniowania ciała idealnie czarnego.

Kształt funkcji $\Phi_{(p)}$ w zakresie dostatecznie niskich ciśnień może być przyjęty jako

$$\Phi_{(p)} \cong b\,.\,p \qquad (2.3)$$

gdzie b jest współczynnikiem o wymiarze W/cm^2 °K mTr, zależnym od rodzaju gazu.

Temperatura elementu grzejnego może być określona w sposób pośredni na podstawie oporności elektrycznej tego elementu. Mianowicie oporność można wyrazić wzorem

$$R \cong R_0\,[1 + \alpha\,(T - T_z)] \qquad (2.4)$$

gdzie R_0 jest opornością w temperaturze otoczenia, np dla 20°C (dla $T_z = 273° + 20° = 293°$K).

α — jest współczynnikiem cieplnym oporności właściwej danego materiału elementu grzejnego.

Dla drutu grzejnego mamy

$$R_0 = \rho_0\,\frac{4\,l}{\pi\,\delta^2} \qquad (2.5)$$

Tutaj ρ_0 jest opornością właściwą dla temperatury $T_z = 293^0K$.

Z równania (2.4) otrzymamy

$$T - T_z = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{R}{R_0} - 1\right) \tag{2.6}$$

oraz

$$T = \frac{1}{\alpha}\left(\frac{R}{R_0} - 1\right) + T_z \tag{2.7}$$

Wyrażając doprowadzaną moc przez prąd I, napięcie U oraz oporność R, piszemy

$$P = U I = I^2 R = \frac{U^2}{R} \tag{2.8}$$

czyli

$$I^2 R [1 + \alpha (T - T_z)] = \frac{U^2}{R_0} \frac{1}{1 + \alpha (T - T_z)} =$$

$$= \pi \delta l a (T^4 - T_z^4) + \pi \delta l \Phi_{(p)} (T - T_z) \tag{2.9}$$

Jest to podstawowe równanie wakumetru oporowego.

Po wprowadzeniu oznaczeń

$$m = \alpha T_z \tag{2.10}$$

$$x = \frac{T}{T_z} \tag{2.11}$$

wzór (2.9) przepiszemy jako

$$I^2 R_0 [1 + m (x - 1)] = \frac{U^2}{R_0} \frac{1}{1 + m (x - 1)} =$$

$$= \pi \delta l a T_z^4 (x^4 - 1) + \pi \delta l T_z \Phi_{(p)} (x - 1) \tag{2.12}$$

Dla bardzo dobrej próżni ($p = 0$), $\Phi_{(p)} = 0$, a przeto

$$P = U I = \pi \delta l a T_z^4 (x^4 - 1) \tag{2.13}$$

$$R = \frac{U}{I} = R_0 \left[1 + m (x - 1)\right] =$$

$$= \frac{4 l \rho_0}{\pi \delta^2} \left[1 + m (x - 1)\right] \tag{2.14}$$

Mnożąc (2.13) przez (2.14) otrzymujemy równanie, skąd

$$U^2 \frac{\delta}{l^2} = 4 \rho_0 a T_z^4 (x^4 - 1) \left[1 + m (x - 1)\right] \tag{2.15}$$

Dzieląc (2.13) przez (2.14) otrzymujemy równanie, skąd

$$\frac{I^2}{\delta^3} = \frac{\pi^2 a T_z}{4 \rho_0} \frac{x^4 - 1}{1 + m (x - 1)} \tag{2.16}$$

Eliminując x z równań (2.15) i (2.16) otrzymamy równanie charakterystyki wakumetru oporowego dla $p = 0$ (rys. 2)

$$U \frac{\delta^{1/2}}{l} = f\left(\frac{I}{\delta^{3/2}}\right) \tag{2.17}$$

Dla środowiska, które idealnie przewodzi ciepło, temperatura elementu oporowego pozostanie stała i równa temperaturze otoczenia. Zatem otrzymamy tu zależność

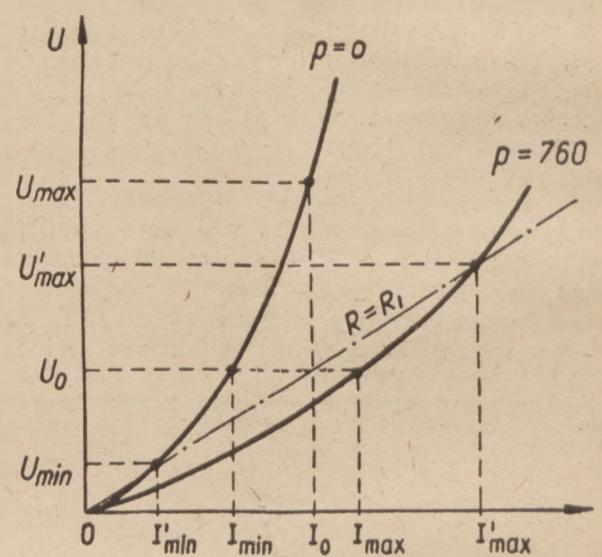
$$U \frac{\delta^{1/2}}{l} = \frac{4 \rho_0}{\pi} \frac{I}{\delta^{3/2}} \tag{2.18}$$

Charakterystyki dla ciśnień gazu, zawartych między 0 a ∞ będą przebiegać między krzywą (2.17) a prostą (2.18), przy czym wszystkie krzywe będą styczne w początku współrzędnych do prostej (2.18).

2.3. Określenie współczynnika b

Współczynnik b określamy z charakterystyk $U = f(I)$ przy $p =$ const. (rys. 3).

W tym celu prowadzimy w polu charakterystyk prostą, wyrażającą opór R elementu



Rys. 3. Charakterystyka wakumetru.

w pewnej temperaturze pracy, i obliczamy moce P odpowiadające punktom przecięcia charakterystyk dla różnych ciśnień. Następnie sporządzamy wykres

$$P - P_0 = f(p) \tag{2.19}$$

gdzie

$$P_0 = U'_{min} I'_{min} \tag{2.20}$$

jest mocą odpowiadającą ciśnieniu $p = 0$. Ponieważ stałej oporności R odpowiada stała temperatura elementu oporowego, przeto — zgodnie z (2.8) i (2.12) — możemy napisać

$$P - P_0 = \pi \delta l T_z (x - 1) \left[\Phi_{(p_1)} - \Phi_{(0)}\right] \tag{2.21}$$

skąd

$$\Phi_{(p_1)} - \Phi_{(0)} = \frac{P - P_0}{\pi \delta l T_z (x - 1)} \tag{2.22}$$

Wyrażając, stosownie do (2.14), x przez R oraz przyjmując kształt funkcji Φ zgodnie z (2.3), otrzymamy

$$b = \frac{m}{\pi \delta l T_z} \cdot \frac{1}{\frac{R}{R_0} - 1} \cdot \frac{P - P_0}{p} \qquad (2.23)$$

3. Układy wakumetrów oporowych

W zależności od sposobu stwierdzania wpływu zmian ciśnienia, rozróżniamy kilka układów wakumetru oporowego.

3.1. W układzie stałego prądu utrzymujemy stałą wartość natężenia prądu $I = I_0 =$ $=$ const, miarą zaś ciśnienia jest napięcie

$$U = f(p) \quad (I = \text{const}) \qquad (3.1)$$

Dla $p = 0$ chłodzenie jest najmniejsze, temperatura najwyższa, a oporność największa; napięcie U osiąga przeto wartość maksymalną U_{max} (rys. 3. – linia pionowa kreskowana).

Dla $p = 760$ Tr chłodzenie jest największe, temperatura i oporność najniższa.

3.2. W układzie stałego napięcia utrzymujemy stałą wartość napięcia $U = U_0 =$ $=$ const, miarą zaś ciśnienia jest natężenie prądu

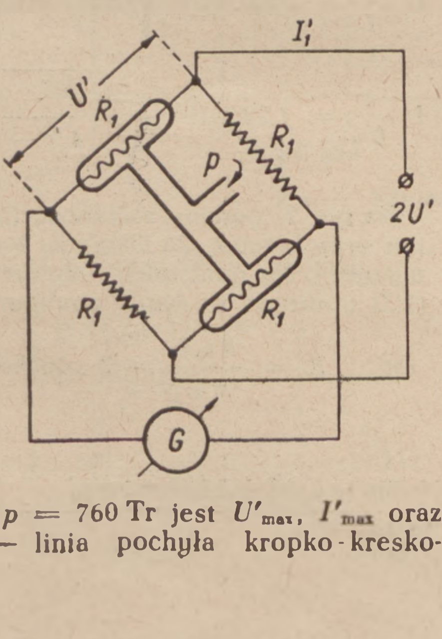
$$I = f(p) \quad (U = \text{const}) \qquad (3.2)$$

Dla $p = 0$ oporność jest największa, a przeto prąd jest najmniejszy I_{min}, podczas gdy dla $p = 760$ Tr uzyskuje wartość największą I_{max} (rys. 3 – linia pozioma kropkowana).

3.3. W układzie stałej oporności utrzymujemy stałą wartość oporności $R = R_1 =$ $=$ const, miarą zaś ciśnienia jest wartość prądu I_1, napięcia U_1 lub mocy $P_1 = U_1 I_1$.

$$U_1,\ I_1,\ P_1 = f(p) \quad (R = \text{const}) \qquad (3.3)$$

Dla $p = 0$ mamy U'_{min}, I'_{min} oraz P'_{min}, podczas gdy dla $p = 760$ Tr jest U'_{max}, I'_{max} oraz P'_{max} (rys. 3 – linia pochyła kropko-kreskowana).



Rys. 4. Układ mostkowy wakumetru oporowego.

Stałość oporności R_1 stwierdzamy np. przy pomocy układu mostkowego (rys. 4).

Wartość mocy P' reguluje się w taki sposób, aby zawsze była oporność $R_1 =$ const, co poznaje się po zerowym położeniu wskazówki galwanometru G.

Najbliższe rozważania będą dotyczyć układu stałego prądu.

4. Układ stałego prądu

Równanie podstawowe (2.12) napiszemy tu jako $I_0^2 R_0 [1 + m(x - 1)] =$

$$= \pi \delta l a T_z^4 (x^4 - 1) + \pi \delta l T_z \Phi_{(p)} (x - 1) \qquad (4.1)$$

Stąd wyznaczamy

$$c\,\Phi_{(p)} = q_1 \left(m + \frac{1}{x - 1}\right) - \frac{x^4 - 1}{x - 1} \qquad (4.2)$$

gdzie, oprócz oznaczeń (2.10) i (2.11), wprowadzamy

$$q_1 = \frac{4 p_0}{\pi^2 a T_z} \cdot \frac{I^2}{\delta^3} \qquad (4.3)$$

$$c = \frac{1}{a T_z^3} \qquad (4.4)$$

Równanie (4.2) wyraża związek między ciśnieniem p, a temperaturą elementu oporowego

$$T = x T_z \qquad (4.5)$$

Zmiany x, zachodzące ze zmianami p, odczytujemy, przy prądzie $I_0 =$ const, jako zmiany napięcia

$$U = I_0 R \qquad (4.6)$$

Wzór (4.6), przy oznaczeniach (2.4) i (4.4), można napisać jako

$$U = U_0 \left[1 + m(x - 1)\right] \qquad (4.7)$$

gdzie

$$U_0 = I_0 R_0 \qquad (4.8)$$

W ten sposób równania (4.2) i (4.7), po wyeliminowaniu z nich x, dają związek między ciśnieniem p a napięciem U:

$$p = f(U) \qquad (4.9)$$

Jest to równanie krzywej wakumetru.

Czułością wakumetru nazwiemy wyrażenie

$$\frac{1}{U} \quad \frac{dU}{d\Phi_{(p)}}, \qquad (4.10)$$

które przedstawia względną zmianę napięcia U na elemencie oporowym w funkcji zmiany ciśnienia p.

Różniczkując (4.2) znajdziemy

$$\frac{d\Phi_{(p)}}{dx} = -\frac{1}{c} \frac{3x^4 - 4x^3 + 1 + q_1}{(x - 1)^2} \qquad (4.11)$$

podobnie z (4.7) mamy

$$dU = I_0 R_0 m\, dx \qquad (4.12)$$

Uwzględniając (4.7), (4.11) i (4.12) w (4.10), otrzymamy

$$\frac{1}{U} \frac{dU}{d\Phi_{(p)}} = - \frac{c \, . \, m}{1 + m\,(x-1)} \frac{(x-1)^2}{3x^4 - 4x^3 + 1 + q_1} \tag{4.13}$$

Dla określenia warunków, w jakich występuje największa czułość wakumetru, znajdziemy maximum wyrażenia (4.13).

Zachodzi ono dla

$$q_{1\,opt} = \frac{9m\,x^5 - (29m-6)\,x^4 + 16\,(2m-1)\,x^3 + 12\,(1-m)\,x^2}{2 + m\,(x-1)} - 1 \tag{4.14}$$

Dla ciśnienia $p \cong 0$ będzie $\Phi_{(p)} \cong 0$, a przeto z wyrażenia (4.2) otrzymujemy

$$q_{1\,max} \cong \frac{x_m{}^4 - 1}{m\,x_{max} - m + 1} \tag{4.15}$$

Tutaj x_{max} określa najwyższą temperaturę, jaką uzyskuje element oporowy w najlepszej próżni ($p \cong 0$), gdzie chłodzenie przez przewodność gazu jest równe zeru.

Jeśli założymy, że ta maksymalna temperatura

$$T_{max} = x_{max}\; T_z \tag{4.16}$$

nie powinna być przekroczona, obliczymy odprowadzającą jej wartość natężenia prądu ze wzoru (4.3) jako

$$I_0^2 = \frac{\pi^2 a\, T_z^4\, \delta^3}{4\,\rho_0} \frac{x_{max}^4 - 1}{m\,x_{max} - m + 1} \tag{4.17}$$

Napięcie odpowiadające tej temperaturze będzie

$$U_{max} = I_0\, R_0\, [1 + m\,(x_{max} - 1)] \tag{4.18}$$

W razie gdy wakumetr ma posiadać maximum czułości właśnie w otoczeniu $p \cong 0$, wówczas warunki (4.14) i (4.16) muszą być równocześnie spełnione:

$$q_{1\,opt} = q_{1\,max} \tag{4.19}$$

Otrzymujemy stąd — przy danym m — najkorzystniejsze wartości $q_{i\,opt}$ i x_{opt}.

Dla ciśnienia $p = p_1 > 0$ otrzymamy czułość mniejszą. Dla uzyskania maksymalnej czułości dla tego większego ciśnienia p_1, należy temperaturę elementu oporowego zwiększyć do wartości x_1 ($> x_{max}$); wartość tę można wyznaczyć z równania, otrzymanego z (4.2) i (4.14):

Mając x_1, obliczymy najkorzystniejsze q z równania (4.14), wzgl. (4.2), a następnie odpowiadającą wartość I_0 z (4.3).

5. Element oporowy z wolframu

W zakresie interesujących nas temperatur od $T_z = 293^0$K do $T = 800^0$K ($20^0 \div 500^0$C) mamy dla drutu wolframowego średnio:

1. cieplny współczynnik oporności właściwej

$$\alpha \cong 4{,}55 \,.\, 10^{-3} \tag{5.1}$$

2. oporność właściwa przy $T_z \cong 293^0$ K

$$\rho_0 = 5{,}48 \,.\, 10^{-6}\ \Omega\,\text{cm} \tag{5.2}$$

3. współczynnik Stefan'a-Boltzmann'a

$$a \cong 1{,}5 \,.\, 10^{-12}\ \text{W}/\text{cm}^2\,{}^0\text{K}^4 \tag{5.3}$$

Na podstawie (5.1) wyrażenie (2.10) będzie miało wartość

$$m = \alpha\, T_z = 4{,}55 \,.\, 10^{-3} \,.\, 293 \cong 1{,}33 \cong \frac{4}{3} \tag{5.4}$$

Wyrażenia (2.15) i (2.16) będzie można przedstawić jako

$$U \frac{\delta^{1/2}}{l} = 2{,}85 \,.\, 10^{-4} \sqrt{(x^4 - 1)\,(4x - 1)} \tag{5.5}$$

$$I \frac{1}{\delta^{3/2}} = 1{,}22 \,.\, 10^2 \sqrt{\frac{x^4 - 1}{4x - 1}} \tag{5.6}$$

Na rys. 2. podano zależność (2.18) dla wolframu oraz krzywą dla ciśnienia $p = 760$ Tr w powietrzu. Na podstawie wyrażenia (2.18) lub (2.5) oporność w stanie zimnym będzie

$$R_0 = \frac{4\,\rho_0\, l}{\pi\,\delta^2} = 7 \,.\, 10^{-6} \frac{l}{\delta^2} \tag{5.7}$$

$$\frac{\dfrac{x_1^4 - 1}{x_1 - 1} + c\,\Phi_{(p_1)}}{m + \dfrac{1}{x_1 - 1}} = \frac{9m\,x_1^5 - (29m-6)\,x_1^4 + 16\,(2m-1)\,x_1^3 + 12\,(1-m)\,x_1^2}{2 + m\,(x_1 - 1)} - 1 \tag{4.20}$$

Stosunek oporności w stanie gorącym i zimnym wyniesie, zgodnie z (2.14)

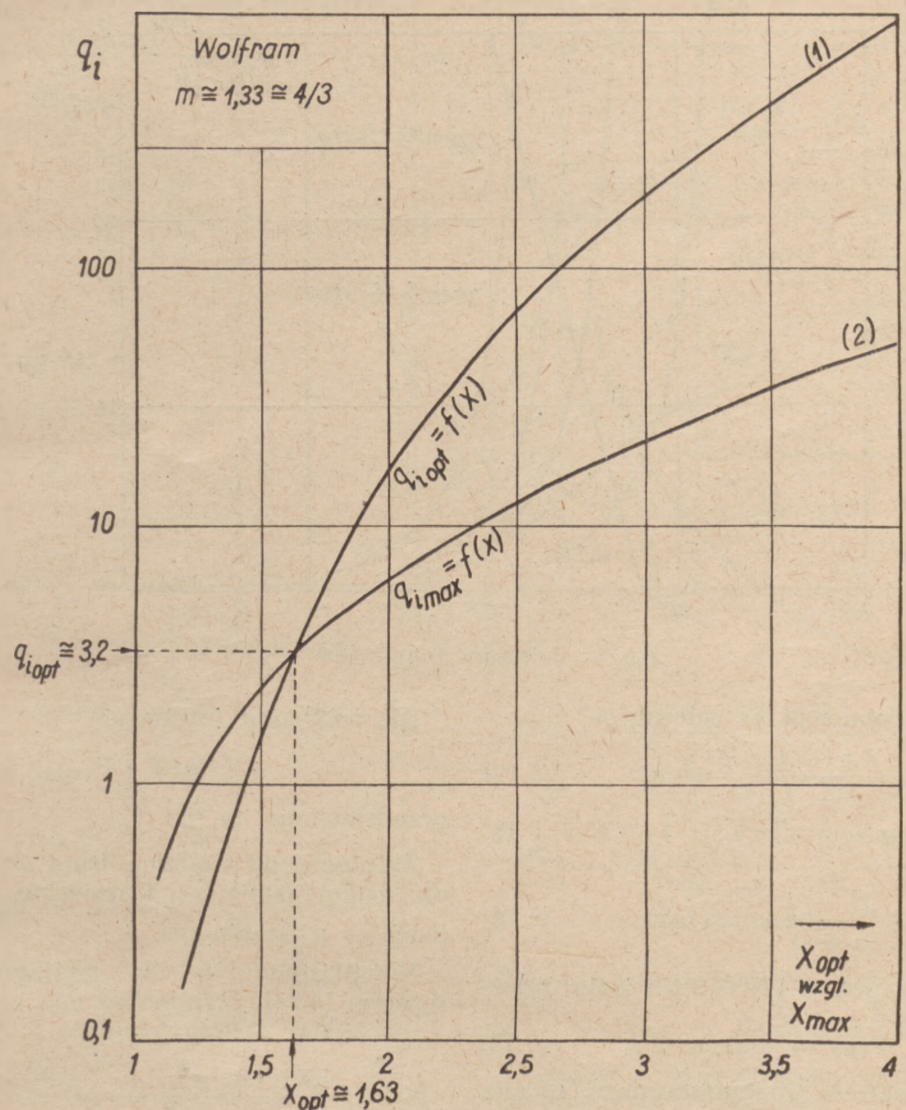
$$\frac{R}{R_0} = 1 + 1{,}33\,(x-1) = \frac{1}{3}\,(4x-1) \qquad (5.8)$$

Współczynnik (4.4) będzie

$$c = 2{,}7\,.\,10^4 \qquad (5.9)$$

W dalszym ciągu otrzymamy wyrażenia na:
1. czułość wakumetru

$$\frac{1}{U}\,\frac{d\,U}{d\,\Phi_{(p)}} = -\frac{10{,}8\,.\,10^4}{4x-1}\,\frac{(x-1)^2}{3x^4-4x^3+1+q_1} \qquad (5.12)$$



Rys. 5. Zależność q_1 od X.

wzory zaś (4.2) i (4.3) przedstawią się jako

$$2{,}7\,.\,10^4\,\Phi_{(p)} = \frac{\frac{1}{3}\,q_1\,(4x-1)-(x^4-1)}{x-1} \qquad (5.10)$$

$$q_1 = 2\,.\,10^{-4}\,\frac{I_0^2}{\delta^3} \qquad (5.11)$$

$$U = \frac{1}{3}\,I_0\,R_0\,(4x-1) \qquad (5{,}11a)$$

2. najkorzystniejszą wartość q_1 (4.14):

$$q_{1\,opt} = \frac{18x^5-49x^4+40x^3-6x^2}{1+2x} - 1 \qquad (5.13)$$

oraz 3. na wartość q_1, odpowiadająca maksymalnej temperaturze (4.15):

$$q_{1\,max} = \frac{3\,(x_{max}^4-1)}{4\,x_{max}-1} \qquad (5.14)$$

Na rys. 5 podano krzywe, wyrażające rów-

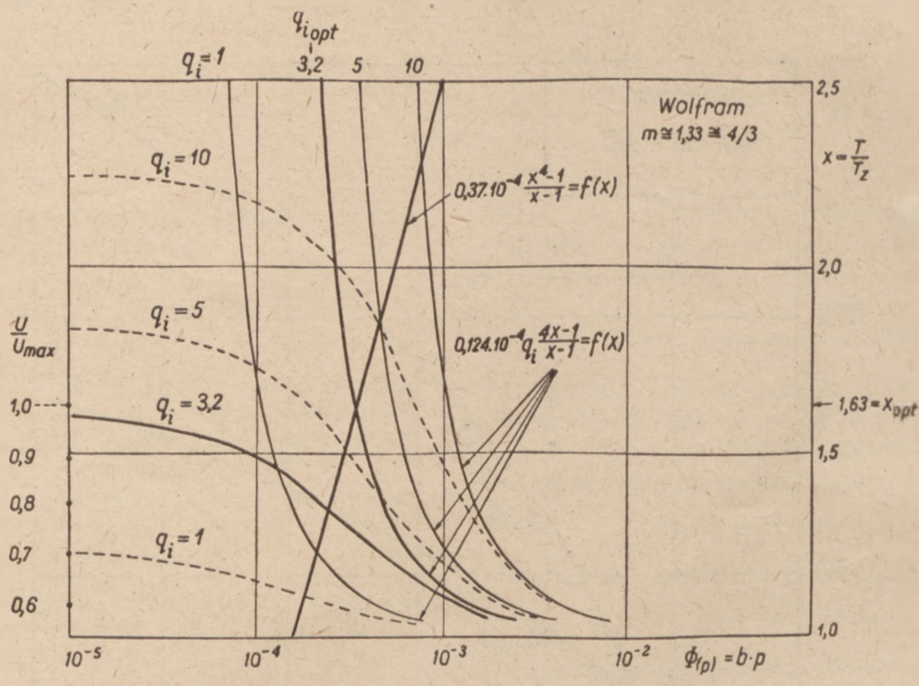
nania (5.13) i (5.14). Warunek (4.19), wynikający z przecięcia się obu krzywych, jest

$$q_{i\,opt} = q_{i\,max} \cong 3{,}2 \qquad (5.15)$$

$$x_{opt} \cong 1{,}63 \qquad (5.16)$$

Zależność ta pozwoli wykreślić, obok skali x, skalę $\frac{U}{U_{max}}$, jak to pokazano na rys. 6.

Najkorzystniejsze warunki pracy dla ciśnień większych od zera znajdziemy z zależności (4.20) podstawiając tam odpowiednią wartość $\Phi(p)$.



Rys. 6. Zależność $\Phi(p) = f(x)$

Na rys. 6 podano wykres zależności

$$0{,}124 \,.\, 10^{-4}\, q_i \frac{4x-1}{x-1} = f(x) \qquad (5.17)$$

z q_i jako parametrem dla $q_i = 1;\ 3{,}2;\ 5$ i 10, oraz wykres

$$0{,}37 \,.\, 10^{-4} \frac{x^4-1}{x-1} = f(x) \qquad (5.18)$$

Różnica krzywych (5.12) i (5.13) daje zależność (5.10)

$$\Phi(p) = f(x). \qquad (5.19)$$

z q_i jako parametrem (linie przerywane, rys. 6).

Dla $q_i = 3{,}2$ otrzymujemy krzywą, odpowiadającą największej czułości wakumetru dla $p = 0$.

Korzystając z zależności (4.7) i (4.18), możemy napisać

$$\frac{U}{U_{max}} = \frac{4x-1}{4x_{max}-1} \qquad (5.20)$$

gdzie

$$U_{max} = \frac{1}{3} R_0\, I_0\, (4x_{max} - 1) \qquad (5.20a)$$

Dla $x_{opt} = 1{,}63$ będziemy mieli

$$\frac{U}{U_{max}} = 0{,}182\,(4x-1) = 0{,}725\,x - 0{,}182 \qquad (5.21)$$

Dla wolframu zależność

$$x_{opt} = f\,\left[\Phi(p)\right] \qquad (5.22)$$

przedstawiono na rys. 7.

Zależność od średnicy drutu wolframowego δ dla najkorzystniejszej wartości $q_{i\,opt} = 3{,}2$ podano na wykresie rys. 8.

Współczynnik b dla wolframu wyrazimy wzorem (4.24), przyjmując tam $m = 1{,}33$ oraz $T_z = 293^0$ K. Otrzymamy

$$b = \frac{1{,}45 \,.\, 10^{-3}}{\delta\, l} \; \frac{1}{\frac{R}{R_0} - 1} \; \frac{P - P_0}{p} \qquad (5.23)$$

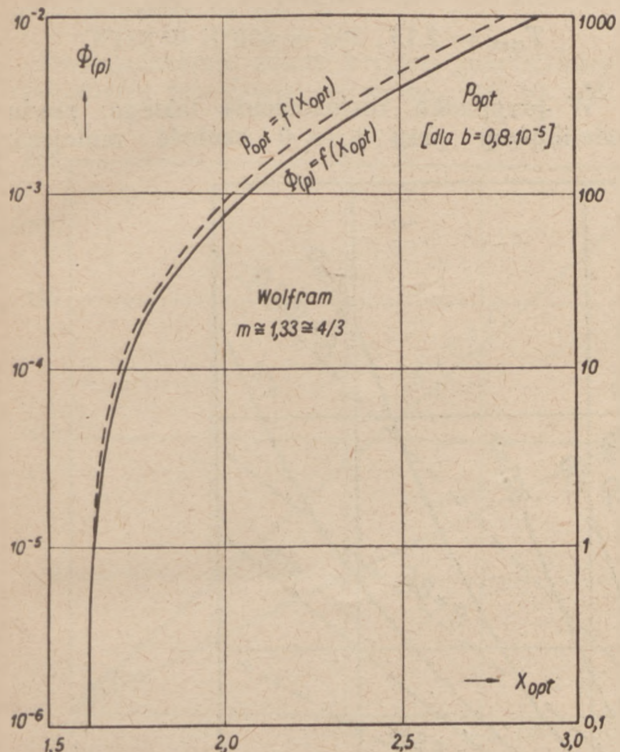
Wartość współczynnika b dla głowic wakumetrowych o średnicy cylindra paru dziesiątków milimetrów, z drutem wolframowym w kształcie litery V o grubościach od 0,003 do 0,007 cm, wynosi dla suchego powietrza

$$b \cong (0{,}75 - 0{,}85) \,.\, 10^{-5}\ \mathrm{W/cm^2} \,.\, {}^0\mathrm{K} \,.\, \mathrm{mTr} \qquad (5.24)$$

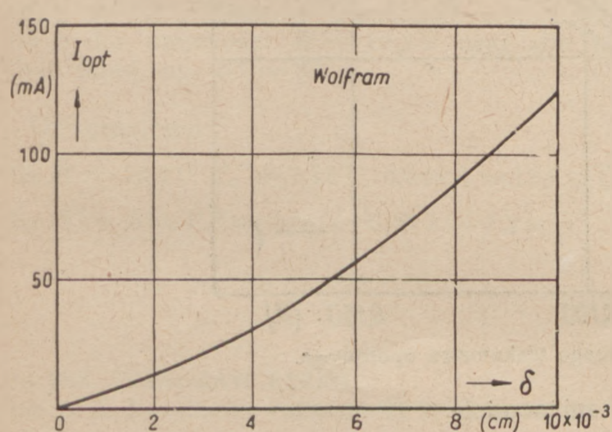
6. Przykład

Przeliczymy wakumetr przewodnościowy, pracujący przy stałym prądzie, z elementem oporowym z drutu wolframowego o średnicy

$\delta = 0{,}005$ cm i długości $l = 20$ cm. Najpierw zaprojektujemy wakumetr na największą czułość w zakresie najmniejszych ciśnień.



Rys. 7. Zależność $X_{opt} = f\,[\Phi(p)]$.



Rys. 8. Zależność $I_{opt} = f(\delta)$.

Z warunku (5.15) przyjmujemy $q_i = 3{,}2$ i ze wzoru (5.11) obliczamy najkorzystniejszy prąd

$$I_{0\,opt} = \sqrt{\frac{3{,}2\;.\;0{,}005^3}{2\;.\;10^{-4}}} \cong 0{,}045\ \mathrm{A}.$$

Temperaturę maksymalną obliczamy z warunku

$$x_{max} = x_{opt} \cong 1{,}63$$

jako

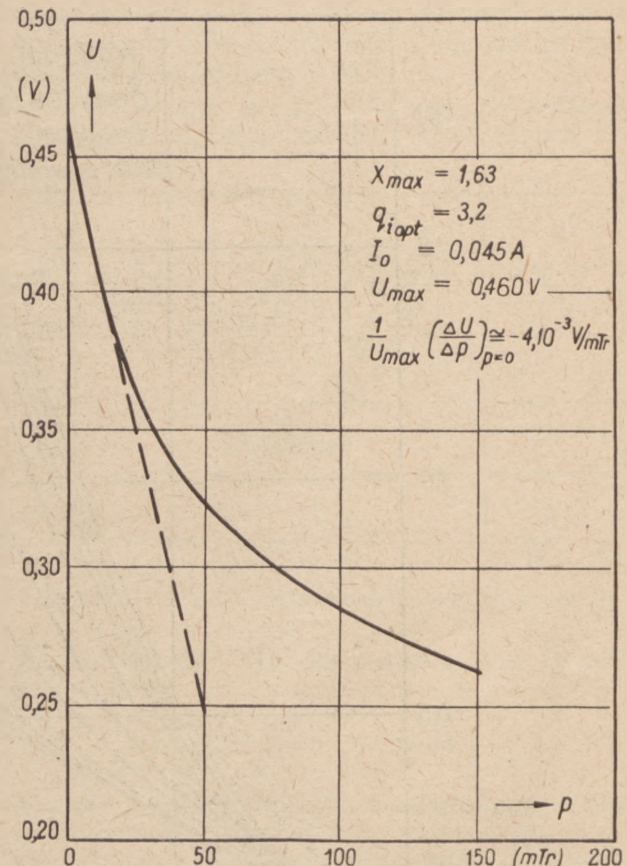
$$T_{max} = 1{,}63\;.\;293 = 478^0\,\mathrm{K} = 185^0\,\mathrm{C}$$

Oporność w stanie zimnym, zgodnie z (5.7), jest

$$R_0 = 7.10^{-6}\,\frac{20}{0{,}005^2} = 5{,}6\ \Omega$$

W stanie gorącym, na podstawie (5.8),

$$R = 5{,}6 \cdot \frac{1}{3}\,(4\;.\;1{,}63 - 1) = 10{,}2\ \Omega$$



Rys. 9. Zależność $U = f(p)$.

Zatem napięcie maksymalne (dla $p = 0$)

$$U_{max} = 0{,}045\;.\;10{,}2 \cong 0{,}46$$

Czułość wakumetru dla najniższych ciśnień, zgodnie z (5.12), będzie

$$\frac{1}{U_{max}}\,\frac{\Delta U}{\Delta \Phi_{(p=0)}} = -\,\frac{10{,}8\;.\;10^4}{4\;.\;1{,}63 - 1}\;\frac{(1{,}63 - 1)^2}{3\;.\;1{,}63^4 - 4\;.\;1{,}63^3 + 1 + 3{,}2} \cong -\,950$$

Zakładając

$$\Phi(p) = b\,p$$

otrzymamy

$$\frac{1}{U_{max}}\left(\frac{\Delta U}{\Delta p}\right)_{p \cong 0} = -\,950\;.\;b$$

Przyjmujemy, zgodnie z (5.24), dla powietrza

$$b = 0,8 \cdot 10^{-5}$$

a przeto

$$\left(\frac{\Delta U}{\Delta p}\right)_{p \cong 0} = -0,46 \cdot 950 \cdot 0,8 \cdot 10^{-5} \cong -0,35 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{V/mTr}$$

Oznacza to, iż np. zmiana ciśnienia od $p = 0$ do $p = 10\,\mathrm{mTr}$ da zmianę (spadek) napięcia od $U_{max} = 0,460$ V do $U = 0,460 - 0,0035 \cdot 10 = 0,425$ V.

Dla określenia największej czułości dla ciśnień większych, np. dla $p = 50\,\mathrm{mTr}$, obliczymy

$$\Phi_{(p=50)} = 0,8 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \cong 4 \cdot 10^{-4}$$

Z krzywej z rys. 7 dla tej wartości $\Phi_{(50)}$ znajdujemy $x_{opt} \cong 1,85$, czemu odpowiada według krzywej (1) z rys. 5

$$q_{1\,opt} \cong 9,5.$$

Wzór (5.11) daje dla tej wartości $q_{1\,opt}$

$$I_0 = \sqrt{\frac{9,5 \cdot 0,005^3}{2 \cdot 10^{-4}}} \cong 0,075\ \mathrm{A}.$$

Ten prąd przy $p = 0$ wytworzy, zgodnie z wykresem (2) na rys. 5 dla $q_1 = 9,5$ — temperaturę ($x_{max} = 2,15$)

$$T_{max} = 2,15 \cdot 293 = 630^0\,\mathrm{K} = 337^0\mathrm{C}$$

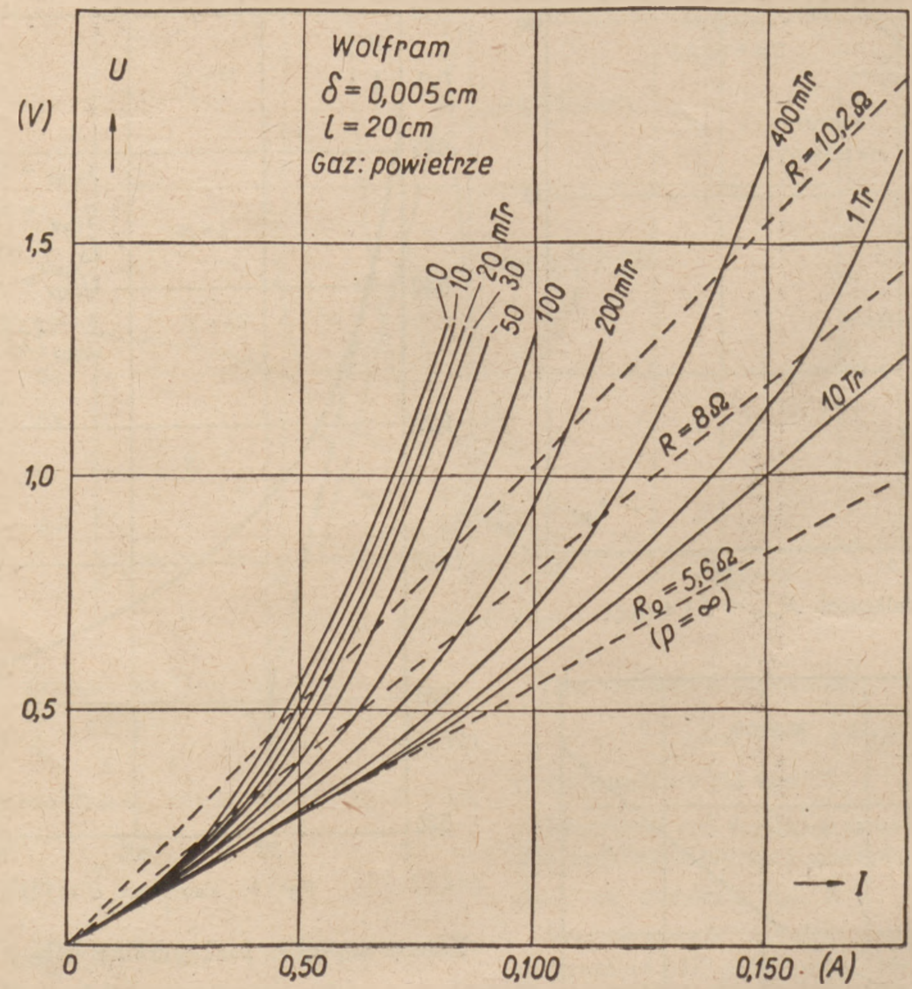
W przypadku zastosowania takiego prądu mielibyśmy przy $p = 0$ czułość mniejszą, a mianowicie

$$\frac{1}{U_{max}}\left(\frac{\Delta U}{\Delta \Phi}\right)_{p=0} = -\frac{10,8 \cdot 10^4}{4 \cdot 2,15 - 1} \cdot \frac{(2,15 - 1)^2}{3 \cdot 2,15^4 - 4 \cdot 2,15^3 + 1 + 9,5} \cong -550$$

a więc mniej więcej dwukrotnie mniejszą niż dla prądu $I_0 = 0,045$ A.

W celu wykreślenia krzywej wakumetru (dla $I_0 = 0,045$ A) skorzystamy z wykresów na rys. 6., biorąc krzywą $q_1 = 3.2$ i przekształcając jej skalę x w oparciu o zależności (5.21) na skalę U; skalę $\Phi(p)$ przedstawimy jako

$$\Phi(p) = 0,75 \cdot 10^{-5}\, p.$$



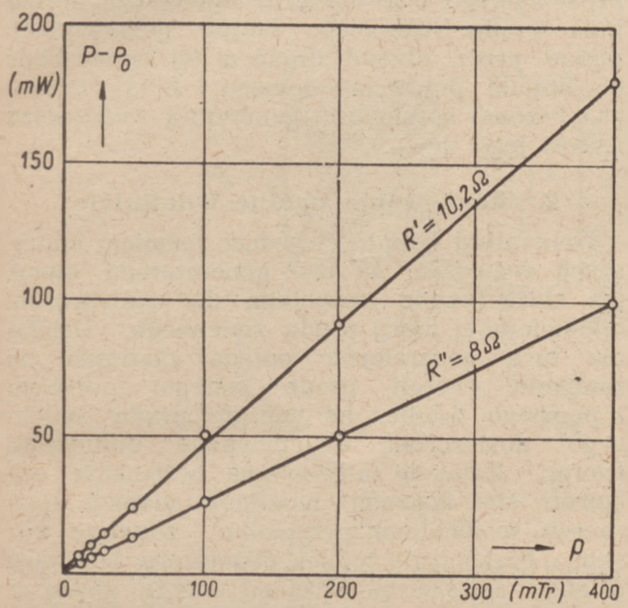
Rys. 10. Charakterystyki przeliczanego wakumetru oporowego.

Otrzymamy wówczas wykres

$$U = f(p)$$

przedstawiony na rys. 9.

Doświadczalnie zdjęte krzywe przeliczanego wakumetru przedstawione są na rys. 10. Mo-



Rys. 11. Zależność mocy od ciśnienia.

żemy na ich podstawie wyznaczyć współczynnik b dla oporności $R' = 10{,}2\,\Omega$ oraz dla jakiejś innej, np. $R'' = 8\,\Omega$

Otrzymujemy

dla $R' = 10{,}2\,\Omega$, $P_0' = 0{,}45\text{ V} \cdot 0{,}044\text{ A} = 19{,}8\text{ mW}$

dla $R'' = 8\,\Omega$, $P_0'' = 0{,}24\text{ V} \cdot 0{,}03\text{ A} = 7{,}2\text{ mW}$.

Następnie wykreślamy zależność

$$P - P_0 = f(p)$$

dla R' i R'' (rys. 11).

Zależności te są zbliżone do prostych, a przeto $b \cong \text{const.}$

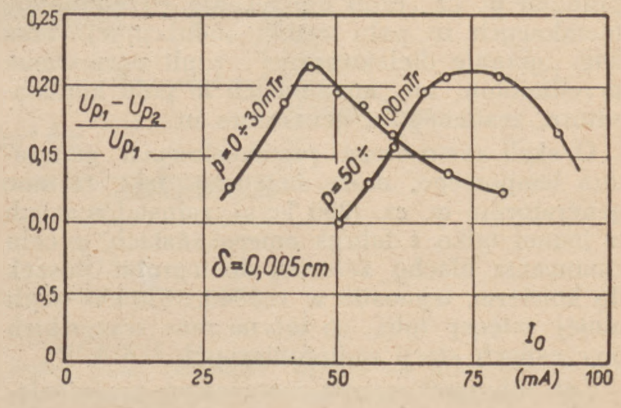
Otrzymujemy stąd $(P - P_0) : p$

dla R' ok. 0,45 mW/mTr,

dla R'' ok. 0,24 mW/mTr.

Podstawiając do (5.22) otrzymamy średnio $b \cong 0{,}8 \cdot 10^{-5}\ \text{W/cm}^2\ {}^0\text{K. mTr.}$ (to, co przyjęliśmy w przykładzie).

Na podstawie krzywych z rys. 11 możemy sporządzić wykresy czułości dla różnych za-



Rys. 12. Zależność największej czułości od prądu I_0.

kresów ciśnień. Np. w zakresie 0 — 30 mTr zależność

$$\frac{U_0 - U_{30}}{U_0} = f(I)$$

posiada przebieg (rys. 12) z maksymum w otoczeniu wartości $I_0 = 45$ mA, podczas gdy w zakresie 50 ÷ mTr odpowiednia krzywa posiada maksymum w otoczeniu 75 mA.

DR INŻ. STANISŁAW RYŻKO
Zakład Radiotechniki Politechniki Warszawskiej

Sprawność generatorów lampowych i sposoby jej zwiększenia

STRESZCZENIE

We wstępnej części artykułu rozpatrzono zależność sprawności generatora lampowego klasy C od dobroci Q obwodu drgań generatora. W wyniku uzyskano wyrażenie (10), które pozwala określić optymalną, ze względu na sprawność generatora, dobroć Q_{sk} obciążonego obwodu drgań w funkcji dobroci Q_0 obwodu nieobciążonego. Następnie przeprowadzono rozważania nad zależnością sprawności generatora od warunków pracy lampy generacyjnej oraz rozpatrzono znane układy generatorów ze zwiększoną sprawnością. Wreszcie w końcowej części artykułu opisano nowy układ generatora ze zwiększoną sprawnością i podano wyniki laboratoryjnego badania tego generatora.

The Efficiency of the RF Power Amplifiers and the Means for their Improvement

SUMMARY

The author considers the interdependence of the efficiency of class C tuned amplifier and the Q value of the plate tank circuit. Optimum ratio of the loaded Q_{sk}

to the unloaded Q_0 is given. Further the influence of the shape of the load line on the amplifier efficiency is investigated. A modified tuned amplifier circuit, based on the above considerations, is developed.

1. Wstęp

W początkowym okresie swego rozwoju, generator lampowy służył jedynie potrzebom telekomunikacji. Wybudowanie lamp dużej mocy, chłodzonych stucznie, oraz lamp przystosowanych do pracy przy bardzo dużych częstotliwościach, dało możliwości techniczne budowy generatorów lampowych dla różnych zastosowań w przemyśle. Najważniejsze z tych zastosowań jest to tzw. „grzanie indukcyjne" prądami w. cz., czyli ogrzewanie przedmiotów metalowych w polu cewki indukcyjnej, oraz tzw. „grzanie dielektryczne", czyli ogrzewanie przedmiotów nie metalowych w polu kondensatora, zasilanego z generatora w. cz.

O skali zastosowań przemysłowych generatora lampowego, może świadczyć fakt, iż moc generatorów w. cz. (200 kc/s), zainstalowanych w jednej tylko z fabryk amerykańskich, w celu cynowania blachy żelaznej do wyrobu puszek do konserw, wynosiła w r. 1943 3730 kW czyli mniej więcej tyle, co łączna moc wszystkich ówczesnych stacji radiofonicznych U.S.A.[5]) *)

Ten olbrzymi wzrost zastosowań przemysłowych generatora lampowego, spowodował aktualność takich zagadnień z dziedziny generacji lampowej, które nie były istotne wówczas, gdy generator ten służył wyłącznie celom telekomunikacji. Do zagadnień takich należy przede wszystkim zaliczyć problem sprawności generatora lampowego typu „przemysłowego". Uzyskanie bowiem dużej sprawności generatora lampowego typu przemysłowego, jest jednym z zasadniczych warunków, stawianych przez przemysł, ze względu na koszta produkcji.

Istotnie w prasie radiotechnicznej zagadnieniu sprawności generatora lampowego poświęca się ostatnio niemałą uwagę.[1]) [2]) [8]) [4]) [6]) [12]) Niektóre z publikacji podają gotowe metody powiększenia sprawności generatora lampowego. Metody te polegają na odpowiednim odkształceniu napięcia anodowego, rzadziej siatkowego, lampy generacyjnej, przez wprowadzenie w układ generatora dodatkowego napięcia 2-giej wzgl. 3-ciej harmonicznej częstotliwości podstawowej, o odpowiedniej fazie i amplitudzie.

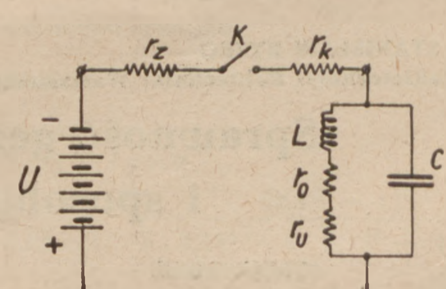
Praca niniejsza jest również poświęcona zagadnieniu zwiększenia sprawności generatora lampowego; w wyniku jej opracowano pewien nowy sposób zwiększenia sprawności generatora. Sposób ten, w odróżnieniu od wspomnianych wyżej, polega na wprowadzeniu w układ generatora dodatkowej lampy. Lampa ta w odpowiednich momentach cyklu oscylacyjnego, a mianowicie w momentach przepływu prądu przez lampę generacyjną, powoduje odkształcenie chwilowego napięcia siatki lampy generacyjnej w taki sposób, że impuls prądu anodowego lampy przybiera kształt zbliżony do prostokątnego. W układzie opracowanym impuls prądu siatkowego lampy generacyjnej, płynie przez obwód drgań w tej samej fazie co impuls prądu anodowego, dzięki czemu zwiększonej sprawności generatora towarzyszy wzrost jego mocy.

*) Cyfry w odnośnikach oznaczają pozycję wykazu literatury.

2. Rozważania ogólne i definicje

Generatory lampowe, będące tematem niniejszych rozważań, są tzw. generatorami mocy, tzn. służą przede wszystkim do wytworzenia odpowiedniej mocy prądu zmiennego. Działanie tych generatorów polega właściwie na zamianie energii prądu stałego, pobranej z pewnego źródła, na energię prądu zmiennego, dostarczoną do pewnego odbiornika energii. Zamiana ta powinna oczywiście odbywać się kosztem możliwie małych strat energii, w idealnym przypadku — zupełnie bez strat. Praktycznie jednak generatory lampowe działają zawsze ze stratami energii; straty te zamieniają się prawie całkowicie w ciepło, wydzielające się w elementach generatora. Dopuszczalny wzrost temperatury elementów generatora ma wartość ograniczoną, straty więc energii, jakie mogą występować podczas pracy generatora w jego elementach, są również ograniczone do pewnej maksymalnej wartości. Wskutek tego moc użyteczna, jaką może dać dany generator lampowy (o określonych elementach), będzie tym większa, im większa będzie sprawność generatora, czyli stosunek mocy użytecznej do mocy pobranej ze źródła.

Ideowy układ generatora mocy jest przedstawiony na rys. 1. Na rysunku tym, źródłem



Rys. 1. Ideowy układ generatora lampowego.

prądu stałego jest baterja akumulatorów o napięciu U i oporności wewnętrznej r_z. Obwód drgań generatora składa się z równolegle połączonych: cewki L i kondensatora C. Opornik r_0, włączony w obwód drgań, reprezentuje oporność własną obwodu (straty w obwodzie),

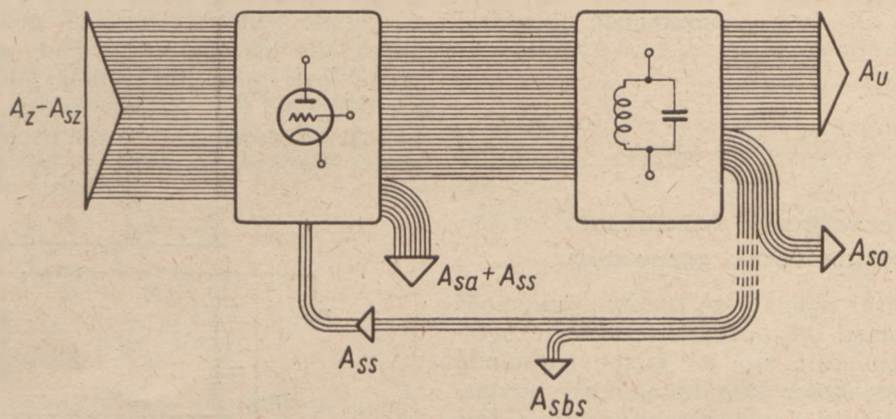
opornik zaś r_u reprenzentuje odbiornik energii prądu zmiennego. Obwód drgań jest połączony ze źródłem energii za pośrednictwem wyłącznika K i opornika r_K, który reprezentuje oporność zamkniętego wyłącznika.

Działanie generatora, uwidocznionego schematycznie na rys. 1, polega na własnościach rezonansowych jego obwodu drgań. Elementy tego obwodu winny być tak dobrane dla danej częstotliwości, aby zapas energii w obwodzie był dużo większy niż energia tracona w opornikach r_u i r_0 w ciągu 1 okresu drgań. W takim przypadku, w stanie ustalonym pracy generatora, w obwodzie jego będą płynęły prądy sinusoidalne, a energia tracona przez obwód (w ciągu 1 okresu drgań) w opornikach r_u i r_0 będzie uzupełniana co każdy okres drgań przez baterię. Uzupełnianie energii obwodu można uskuteczniać np. zamykając na chwilę wyłącznik K, w momencie końcowym każdego okresu drgań, wskutek czego z baterii płynie wówczas impuls prądu, doładowujący kondensator obwodu do stanu, jaki istniał na początku okresu drgań.

W rzeczywistych generatorach, rolę wyłącznika spełnia lampa generacyjna, zazwyczaj lampa z siatką czynną. Przestrzeń międzyelektrodowa anoda-katoda tej lampy jest zwykle włączona w szereg z baterią zasilającą i z obwodem drgań generatora. „Zamykanie" lub „otwieranie" tej przestrzeni odbywa się przy pomocy siatki czynnej lampy. Napięcie zmienne, przykładane do siatki czynnej lampy generacyjnej, może być albo czerpane z obwodu drgań — generator nazywamy wówczas samowzbudnym, albo z innego, obcego źródła napięcia, co ma miejsce w generatorach obcowzbudnych. Jest oczywiste, że zmiana napięcia na siatce czynnej lampy generacyjnej wymaga pewnej mocy, zwanej mocą wzbudzenia generatora. Moc ta w generatorze samowzbudnym musi być dostarczona przez obwód oscylacyjny generatora.

Bilans energetyczny generatora z rys. 1 (za pewien okres czasu), w przypadku jeśli będzie to generator samowzbudny, przedstawi się jak na rys. 2.

Energia A_z dostarczona ze źródła prądu stałego, zamieniła się częściowo w energię użyteczną A_u prądu zmiennego, reszta zaś tej energii poszła na pokrycie szeregu strat: A_{sz} — energia tracona w źródle, A_{sa} — energia wydzielona pod postacią ciepła na anodzie lampy, A_{ss} — energia tracona na siatce lampy, A_{sbs} — energia tracona w elementach obwodu siatkowego lampy i wreszcie A_{so} — energia tracona w obwodzie drgań. Równanie bilansu energetycznego przedstawia się więc jak następuje:



Rys. 2. Bilans energetyczny generatora lampowego.

$$A_z = A_u + (A_{sz} + A_{sa} + A_{ss} + A_{sbs} + A_{so}) \quad (1)$$

Sprawność więc ogólna generatora będzie:

$$\eta_{og} = \frac{A_u}{A_z} \quad (2)$$

Wyrażenie powyższe można przedstawić również w innej dogodniejszej do dyskusji postaci, a mianowicie zakładając iż generator jest wzbudzany z obcego źródła i pomijając obwód wzbudzenia i straty w siatce lampy generacyjnej, równanie (1) przedstawi się jak następuje

$$A_z = A_u + (A_{sz} + A_{sa} + A_{so}).$$

Przekształcając (2) otrzymamy:

$$\eta_{og} = \frac{A_u}{A_z} = \frac{A_z - A_{sz}}{A_z} \cdot \frac{A_z - (A_{sz} + A_{sa})}{A_z - A_{sz}} \cdot \frac{A_u}{A_z - (A_{sz} + A_{sa})}$$

Skąd, wprowadzając oznaczenia:

$$\eta_z = \frac{A_z - A_{sz}}{A_{sz}} \quad \text{(sprawność źródła)},$$

$$\eta_a = \frac{A_z - (A_{sz} + A_{sa})}{A_z - A_{sz}} \quad \text{(sprawność anodowa lampy)},$$

$$\text{i} \quad \eta_{obw} = \frac{A_z - (A_{sz} + A_{sa} + A_{so})}{A_z - (A_{sz} + A_{sa})} =$$

$$= \frac{A_u}{A_z - (A_{sz} + A_{sa})} \quad \text{(sprawność obwodu)}.$$

Otrzymamy:

$$\eta_{og} = \eta_z \cdot \eta_a \cdot \eta_{obw} \qquad (3)$$

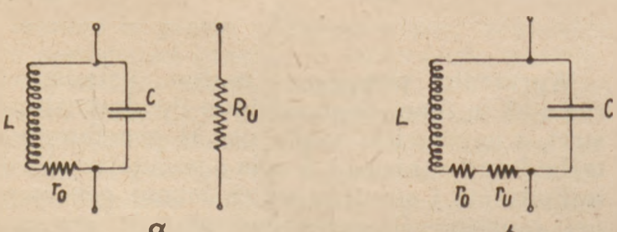
3. Teoretyczne rozważania nad sprawnością generatora

Z równania (3) wynika, że ogólna sprawność generatora zależy od sprawności poszczególnych jego członów: źródła, lampy i obwodu drgań. Aby osiągnąć dużą sprawność ogólną, sprawność każdego z tych członów winna być duża.

Od razu należy tu zaznaczyć, iż sprawność źródła η_z przyjmuje się równą jedności ($\eta_z = 100\%$), praktycznie bowiem oporność r_z w układzie z rys. 1 można uczynić dowolnie małą wobec oporności r_K. Pozostają więc do rozważenia 2 czynniki wzoru 3: η_{obw} i η_a.

3.1. Sprawność obwodu oscylacyjnego

Sprawność obwodu drgań generatora wynika w sposób prosty ze stosunku oporności odbiornika energii r_u do oporności własnej obwodu r_o. Sprawność tą najlepiej wyrazić, posługując się tzw. spółczynnikiem dobroci



Rys. 3. Układ zastępczy obwodu drgań obciążonego oporem R_u

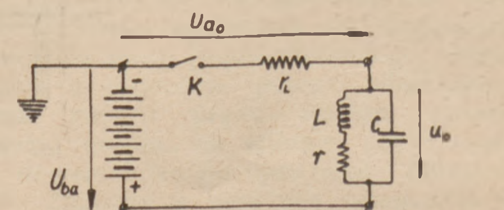
obwodu Q. Jeżeli przez Q_0 oznaczymy dobroć obwodu generatora bez wniesionej doń oporności odbiornika energii (bez obciążenia), przez Q_{sk} zaś — dobroć obwodu z wniesionym doń odbiornikiem energii (patrz rys. 3) to sprawność obwodu η_{obw} wyrazi następująco:

$$\eta_{obw} = \frac{r_0}{r_0 + r_u} = 1 - \frac{Q_{sk}}{Q_0} \qquad (4)$$

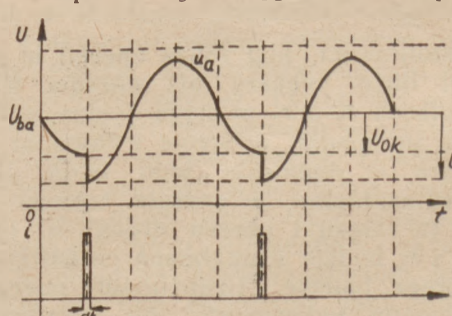
Z wzoru (4) wynika, że sprawność obwodu będzie dostatecznie duża, jeżeli uczynić Q_{sk} dostatecznie małe wobec Q_0. Jednak, jak to będzie wykazane dalej, Q_{sk} nie powinno być zbyt małe, powoduje to bowiem pośrednio małą wartość sprawności lampy η_a, dostateczne natomiast zwiększenie Q_0 jest technicznie osiągalne, pociąga jednak wzrost kosztów obwodu.

3.2. Sprawność lampy generacyjnej

Sprawność η_a lampy, która ma decydujące znaczenie dla sprawności generatora lampowego, nie wyraża się prosto, zależy ona bowiem nie tylko od samej lampy, a więc od jej danych i jej punktu pracy, lecz również zależy od danych obwodu oscylacyjnego. Niemniej jednak sprawność tą można obliczyć



Rys. 4. Uproszczony układ generatora lampowego.



Rys. 4a. Uproszczony przebieg napięcia i prądu w lampie generacyjnej.

ściśle, w każdym konkretnym przypadku, posługując się charakterystykami lampy generacyjnej. Dla celów dyskusji wyprowadzona będzie tutaj analitycznie zależność sprawności od danych generatora, dla pewnych idealnych warunków pracy lampy, dostatecznie jednak bliskich warunkom rzeczywistym,

Jako podstawę rozważań przyjęto przy tym układ generatora z rys. 4. W układzie tym lampa rzeczywista zastąpiona jest przez lampę idealną w postaci wyłącznika K. Oporność tego wyłącznika w stanie otwartym jest nieskończenie wielka, w stanie zaś zamkniętym jest stała i równa r_L. Poza tym idealna „lampa — wyłącznik" ma jeszcze tą cechę, iż dopuszcza przepływ przez siebie dowolnie dużych prądów, co nie jest spełnione w lampie rzeczywistej. W stanie ustalonym oscylacji takiego idealnego generatora przebieg napięć i prądów w czasie będzie taki, jak uwidoczniono na rys. 4a.

Napięcie U_0 na kondensatorze obwodu drgań ma przebieg sinusoidalny o tłumionej amplitudzie. Na końcu każdego okresu drgań napięcie to wynosi U_{ok}; w tym momencie zamykany jest klucz K, na skutek czego z baterii płynie impuls prądu, ładujący kondensator obwodu do napięcia U_{op}. Impuls ładowania trwa bardzo krótko, oporność bowiem wyłącznika K jest tak dobrana (wyłącznik idealny), że stała czasu ładowania $r_L C$ jest dostatecznie mała wobec okresu drgań. Po naładowaniu kondensatora obwodu do napięcia U_{op}, wyłącznik K odłącza baterię, a obwód pozostaje swobodny do chwili wystąpienia następnego impulsu prądu z baterii. Stosunek napięcia na początku okresu drgań obwodu do napięcia na końcu okresu jest zależny od dobroci obwodu i wyraża się znanym wzorem:

$$\frac{U_{ok}}{U_{op}} = e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}$$

stąd

$$U_{ok} = U_{op} \cdot e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}} \tag{5}$$

Przyrost więc napięcia na kondensatorze obwodu, w czasie zamknięcia wyłącznika K, będzie:

$$U_{op} - U_{ok} = U_{op}\left(1 - e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{6}$$

Przyrost ten wywołany jest przypływem ładunku q z baterii; jeśli więc pojemność kondensatora obwodu oznaczymy przez C, to ładunek, jaki przypłynął z baterii, będzie:

$$q = C \cdot U_{op}\left(1 - e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{7}$$

Energia, jaką zyskał kondensator obwodu wskutek przypływu ładunku q, będzie:

$$\frac{C \cdot U^2_{op}}{2} - \frac{C U_{ok}^2}{2} = \frac{C}{2}(U_{op} - U_{ok}) \cdot (U_{op} + U_{ok}) =$$

$$= U_{op}^2\left(1 - e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right)\left(1 + e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) = \frac{C U_{op}^2}{2}\left(1 - e^{-\frac{2\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{8}$$

Energia zaś, jaką dostarczyła bateria do obwodu:

$$q \cdot U_{ba} = C \cdot U_{op} \cdot U_{ba}\left(1 - e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{9}$$

Sprawność więc η, jako stosunek (8) i (9) jest [8]) [11]):

$$\eta = \frac{C U_{op}^2}{2} \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{2\pi}{Q_{sk}}}\right)}{C U_{op} \cdot U_{ba} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right)} = \frac{1}{2}\,\frac{U_{op}}{U_{ba}}\left(1 + e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{10}$$

Sprawność wyrażona równianiem (10) jest to stosunek mocy doprowadzanej do obwodu drgań generatora do mocy pobieranej że źródła prądu stałego. Ponieważ uprzednio uczyniono założenie, iż źródło prądu jest to źródło o znikomo małej oporności wewnętrznej, więc wyrażenie (10) stanowi właściwie sprawność lampy η_a, zdefiniowaną uprzednio, straty bowiem mocy mogą w tym przypadku wystąpić tylko w lampie generacyjnej, reprezentowanej oporem r_K.

3.3. Znaczenie fizyczne wyrażenia na sprawność lampy generacyjnej

Wyrażenie (10), przedstawiające zależność sprawności lampy generacyjnej od warunków jej pracy w generatorze, składa się z dwóch czynników: jeden z nich wyrażony iloczynem:

$$\frac{1}{2}\left(1 + e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{11}$$

zależy tylko od obwodu drgań generatora, drugi zaś, wyrażony ilorazem:

$$\frac{U_{op}}{U_{ba}} \tag{11a}$$

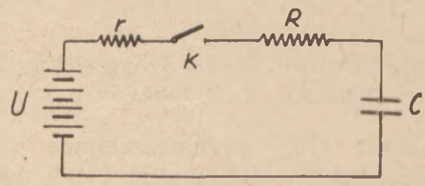
zależy od warunków zasilania lampy generacyjnej.

Rola drugiego z powyższych czynników nie wymaga bliższego wyjaśnienia, czynnik ów bowiem jest analogiczny do znanego z teorii generatorów lampowych tzw. współczynnika wykorzystania napięcia anodowego. Sposoby uzyskania najkorzystniejszej wartości tego czynnika będą rozpatrzone w rozdz. 3.5.

Rola natomiast pierwszego czynnika nie jest odrazu oczywista i wymaga pewnych dodatkowych wyjaśnień. Czynnik ten wyrażony

równaniem (11) zależy od dobroci obwodu drgań generatora, mimo iż określa sprawność lampy generacyjnej. Wynika to z zasadniczego mechanizmu ładowania kondensatora obwodu drgań z baterii zasilającej.

Na rys. 5 przedstawiono układ analogiczny do układu z rys. 1, w którym z baterii o stałym napięciu U i oporze wewnętrznym r, ładowany jest poprzez opór R kondensator C.



Rys. 5. Układ ładowania kondensatora.

Przebiegi chwilowe mocy P_g, dostarczonej przez baterię, P_{R+r} — traconej w opornikach $R+r$ i P_C — mocy zużywanej na ładowanie kondensatora C wyrażają się następującymi funkcjami czasu t*):

$$P_g = \frac{U^2}{R+r} e^{-\frac{t}{(R+r)C}};$$

$$P_{R+r} = \frac{U^2}{R+r} e^{-\frac{2t}{(R+r)C}};$$

$$P_C = \frac{U^2}{R+r}\left(e^{-\frac{t}{(R+r)C}} - e^{-\frac{2t}{(R+r)C}}\right).$$

Sprawność chwilowa zaś ładowania kondensatora wyraża się jako stosunek chwilowych mocy P_c i P_g czyli

$$\eta = \frac{P_c}{P_g} = 1 - e^{-\frac{t}{(R+r)C}}$$

Zależności powyższe podane są w formie wykresów na rys. 6 i 7. Wynika z nich, iż chwilowa sprawność ładowania kondensatora jest równa zeru na początku procesu ładowania, a prawie 100% na końcu procesu. Średnią sprawność można obliczyć, całkując podane wyrażenia na moc chwilową. Otrzymamy wówczas następujące wyrażenia *)

Energia dostarczona przez źródło —

$$W_g = CU^2\left[1 - e^{-\frac{t}{(R+r)C}}\right].$$

Energia stracona w opornikach —

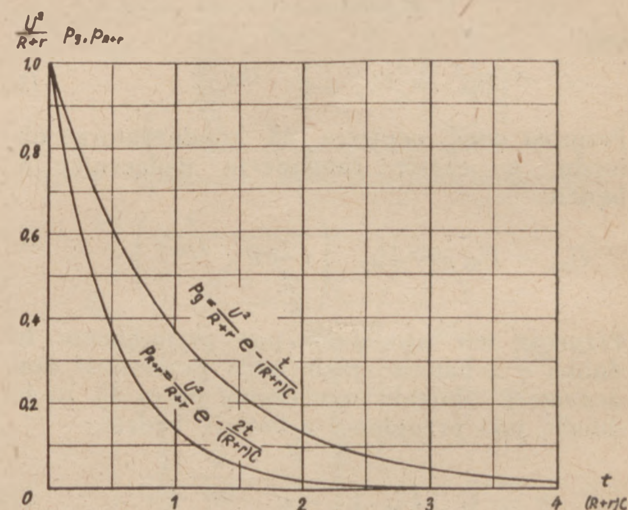
$$W_{R+r} = \frac{CU^2}{2}\left[1 - e^{-\frac{2t}{(R+r)C}}\right];$$

i energia zmagazynowana w kondensatorze —

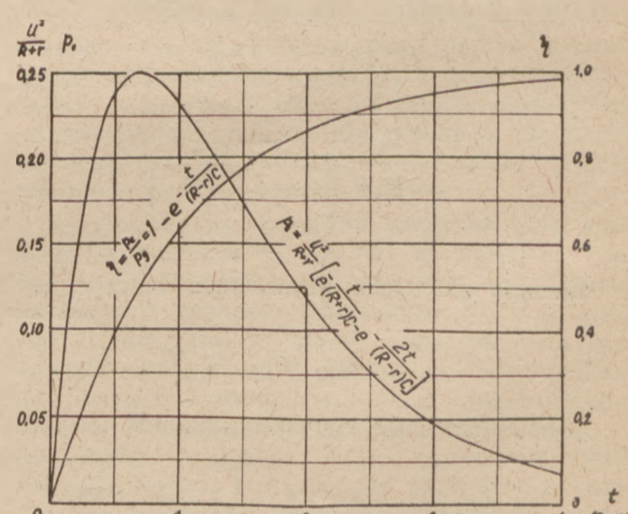
$$W_c = \frac{CU^2}{2}\left[1 + e^{-\frac{2t}{(R+r)C}} - 2e^{-\frac{t}{(R+r)C}}\right].$$

Wyrażenia powyższe są przedstawione wykreślnie na rys. 8.

Z powyższego wynika, iż przy ładowaniu kondensatora ze źródła o stałym napięciu tra-



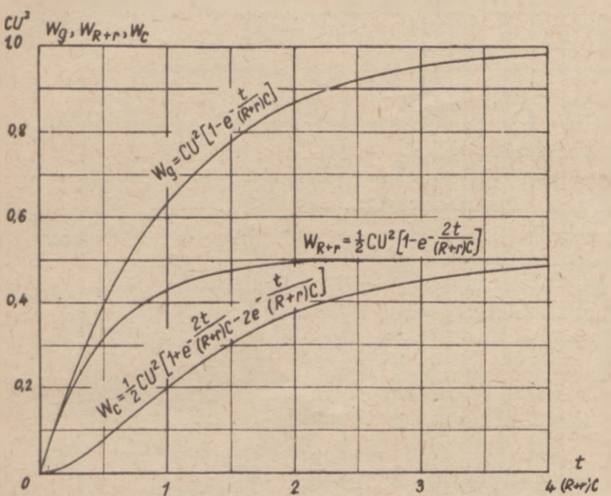
Rys. 6. Przebieg chwilowej mocy dostarczonej i mocy traconej w oporach, w funkcji czasu, przy ładowaniu kondensatora.



Rys. 7. Przebieg chwilowej mocy traconej na ładowanie kondensatora i chwilowej sprawności ładowania, w funkcji czasu, przy ładowaniu kondensatora.

*) patrz E. Frank, Pulsed Linear Networks, str. 63.

cimy zawsze co najmniej połowę energii w oporach szeregowych, przy czym strata ta nie zależy zupełnie od wartości oporu szeregowego. Sprawność ładowania (średnia) wynosi więc najwyżej 50%. Jednakże chwilowa sprawność, a także sprawność średnia za pewne określone odstępy czasu trwania ładowania, może przybierać różne wartości: od zera na początku procesu ładowania do 100% na końcu procesu. Np., jak łatwo obliczyć na



Rys. 8. Przebieg zależności energetycznych procesu ładowania kondensatora.

podstawie rys. 8, średnia sprawność ładowania kondensatora C za okres czasu od $t = 2(R+r)C$ do $t = 4(R+r)C$ wynosi około 95%. Jeżeli więc będziemy czerpali energię z kondensatora w sposób umiarkowany, np. będziemy pobierali energię równą co najwyżej $0{,}1\ CU^2$, czyli 20% energii zmagazynowanej w kondensatorze, to uzupełnienie na nowo tej energii, przez doładowanie kondensatora ze źródła o napięciu U, będzie połączone z bardzo małymi stratami, a sprawność takiego wykorzystywania energii, zmagazynowanej w kondensatorze, będzie rzędu 95%.

Podobnie przedstawiają się sprawy w obwodzie oscylacyjnym generatora lampowego. Tutaj też, kondensator obwodu jest ładowany ze źródła o stałym napięciu poprzez opornik szeregowy, utworzony zwykle tylko przez lampę. Jeżeli obwód oscylacyjny ma dużą dobroć (duże Q_{sk}), to kondensator podczas 1 okresu drgań rozładowuje się nieznacznie (patrz równanie 5), a uzupełnienie energii kondensatora w końcu okresu drgań (ładowanie poprzez lampę z baterii anodowej) będzie się odbywać z dużą sprawnością. Jeżeli natomiast Q_{sk} obwodu jest małe, to kondensator obwodu traci dużo energii podczas 1 okresu drgań; uzupełnienie tej energii przez baterię będzie więc połączone ze stratami energii. Straty te będą tym większe, im więcej energii będzie oddawał kondensator w czasie okresu drgań, wreszcie jeśli warunki będą takie, że kondensator będzie oddawał całą swą energię podczas 1 okresu drgań, sprawność będzie wynosić 50%[9]).

Trzeba tu podkreślić, że straty, jakie występują wskutek małego Q_{sk} obwodu drgań generatora, nie będą zależne (w zasadzie) od lampy generacyjnej; oczywiście musimy mieć tu na uwzględzie idealne założenia, jakie były przyjęte za podstawę rozważań.

3.4. Zależność sprawności ogólnej generatora od dobroci Q obwodu drgań

Rozważania sprawności generatora, przeprowadzone w poprzednim paragrafie, doprowadziły do wniosku, że aby uzyskać dużą sprawność ogólną *generatora*, jego obwód musi mieć dużą dobroć (duże Q_{sk}). Poprzednio rozpatrzone warunki sprawności pracy obwodu drgań (p. 2.1) doprowadziły do wniosku zupełnie przeciwnego, a mianowicie aby sprawność ogólna generatora była duża, sprawność *obwodu* drgań winna być jak największa, co wymaga, aby dobroć Q_{sk} była możliwie mała (patrz równanie 4). Wynika z powyższego, że jest pewna wartość Q_{sk} obwodu drgań, która będzie najbardziej odpowiednia w danych warunkach pracy generatora, dając największą sprawność ogólną generatora.

Wartość tą można znaleźć, rozpatrując wyrażenie:

$$\eta_{og} = \frac{U_{op}}{U_{ba}} \cdot \frac{1}{2}\left(1 - \frac{Q_{sk}}{Q_0}\right) \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{12}$$

stanowiące iloczyn sprawności, wyrażonych równaniami 4 i 10.

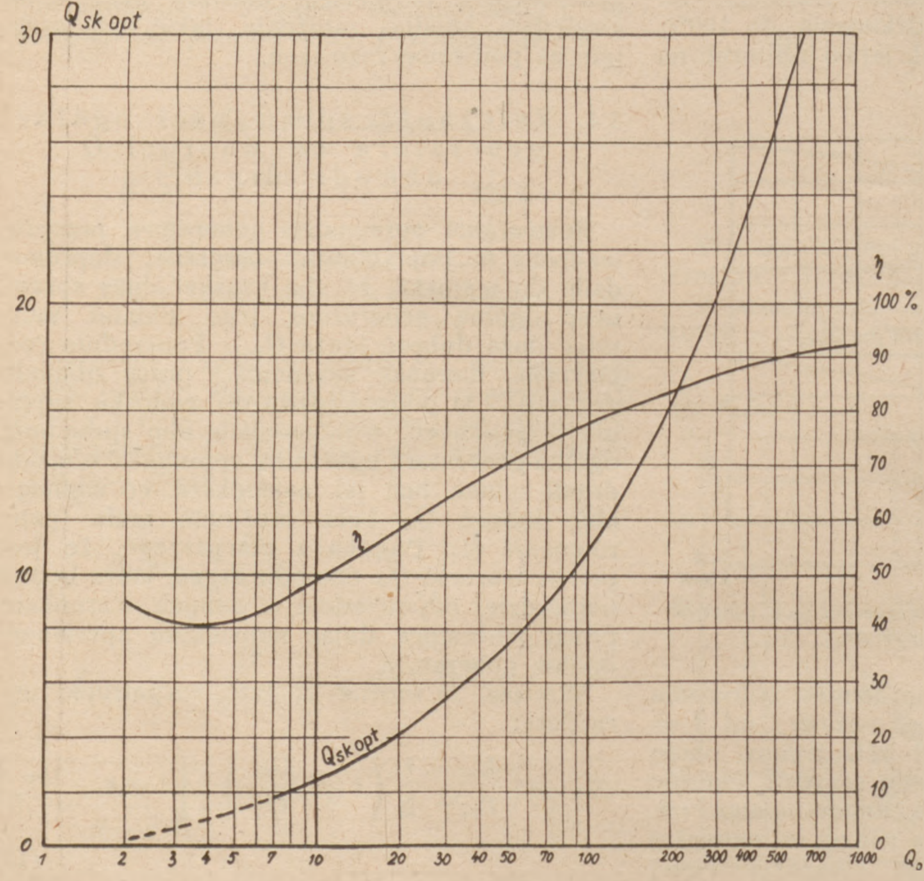
Nie uwzględniając na razie wpływu czynnika $\frac{U_{op}}{U_{ba}}$ na sprawność (t. zn. nie uwzględniając warunków zasilania lampy generacyjnej), możemy wyrazić sprawność generatora w funkcji danych jego obwodu drgań jako:

$$\eta'_{og} = \frac{1}{2}\left(1 - \frac{Q_{sk}}{Q_0}\right)\left(1 + e^{-\frac{\pi}{Q_{sk}}}\right) \tag{13}$$

Dyskusja wyrażenia (13) pozwala określić optymalną wartość dobroci skutecznej obwodu, dla uzyskania największej sprawności ogólnej generatora. Wartość ta wyraża się następującym równaniem:

$$Q_{sk\ opt.} = \frac{Q_0 - \frac{\pi}{2}}{1 + \sqrt{\frac{2\,Q_0}{\pi}}} \tag{14}$$

Zależność optymalnej wartości dobroci obwodu obciążonego ($Q_{sk\ opt.}$) od wartości dobroci obwodu bez obciążenia (Q_0), dla osiągnięcia max. wartości sprawności generatora, wyrażona równaniem (14), jest przedstawiona wykreślnie na rys. 9. Posługując się tym wykresem, można od razu określić optymalną wartość Q_{sk} dla wartości Q_0 zawartych w granicach 10–500, czyli dla większości przypadków występujących w praktyce.



Rys. 9. Zależność optymalnej skutecznej dobroci obwodu Q_{sk} i optymalnej sprawności ogólnej generatora od dobroci obwodu Q_0.

Rys. 9 zawiera również wykres zależności max. wartości sprawności η'_{og} w funkcji optymalnej wartości Q_{sk}.

Wreszcie na rys. 10 przedstawiono rodzinę krzywych, obrazujących przebieg sprawności η'_{og} w funkcji Q_{sk}, dla kilku wartości dobroci obwodu Q_0.

Z wykresów powyższych wynika, jak ważnym czynnikiem, dla uzyskania sprawnej pracy generatora lampowego, jest dobroć jego obwodu drgań. Dla uzyskania dużej sprawności generatora należy zastosować obwód o dużej dobroci (Q_0) i odpowiednio obciążyć ten obwód (Q_{sk}).

3.5. Zależność sprawności od warunków pracy lampy generacyjnej

Wzór (12) zawiera oprócz wyrazów, o wartości określonej dobrocią skuteczną obwodu, wyraz $\frac{U_{op}}{U_{ba}}$, określony warunkami pracy lampy generacyjnej. Występowanie tego wyrazu we wzorze na sprawność generatora jest uzasadnione istnieniem, w warunkach rzeczywistych, pewnego określonego odstępu czasu, niezbędnego dla doładowania kondensatora obwodu drgań generatora. Ten odstęp czasu jest określony w generatorze z rys. 4, wartością stałej czasu $p_L \cdot C$, w stosunku do okresu drgań obwodu generatora. Im stała czasu będzie mniejsza tym bardziej wartość napięcia U_{op}, do jakiej naładuje się kondensator obwodu będzie się zbliżała do wartości napięcia baterii anodowej U_{ba}, dzięki czemu wyraz $\frac{U_{op}}{U_{ba}}$ będzie tym bliższy jedności. Największa wartość stosunku $\frac{U_{op}}{U_{ba}}$, jaką można osiągnąć w układzie generacyjnym z rys. 4, wynosi 1. Wartość tą można (teoretycznie) osiągnąć, dając idealny wyłącznik o oporności r_L dostatecznie bliskiej zera. Zmniejszanie pojemności C kondensatora obwodu drgań nie może być stosowane, gdyż prowadzi to, przy stałej wartości Q_{sk} obwodu, do zmniejszania się tzw. oporności dynamicznej obwodu R_d, określonej zależnością:

$$R_d = \frac{L}{C \cdot r}, \tag{15}$$

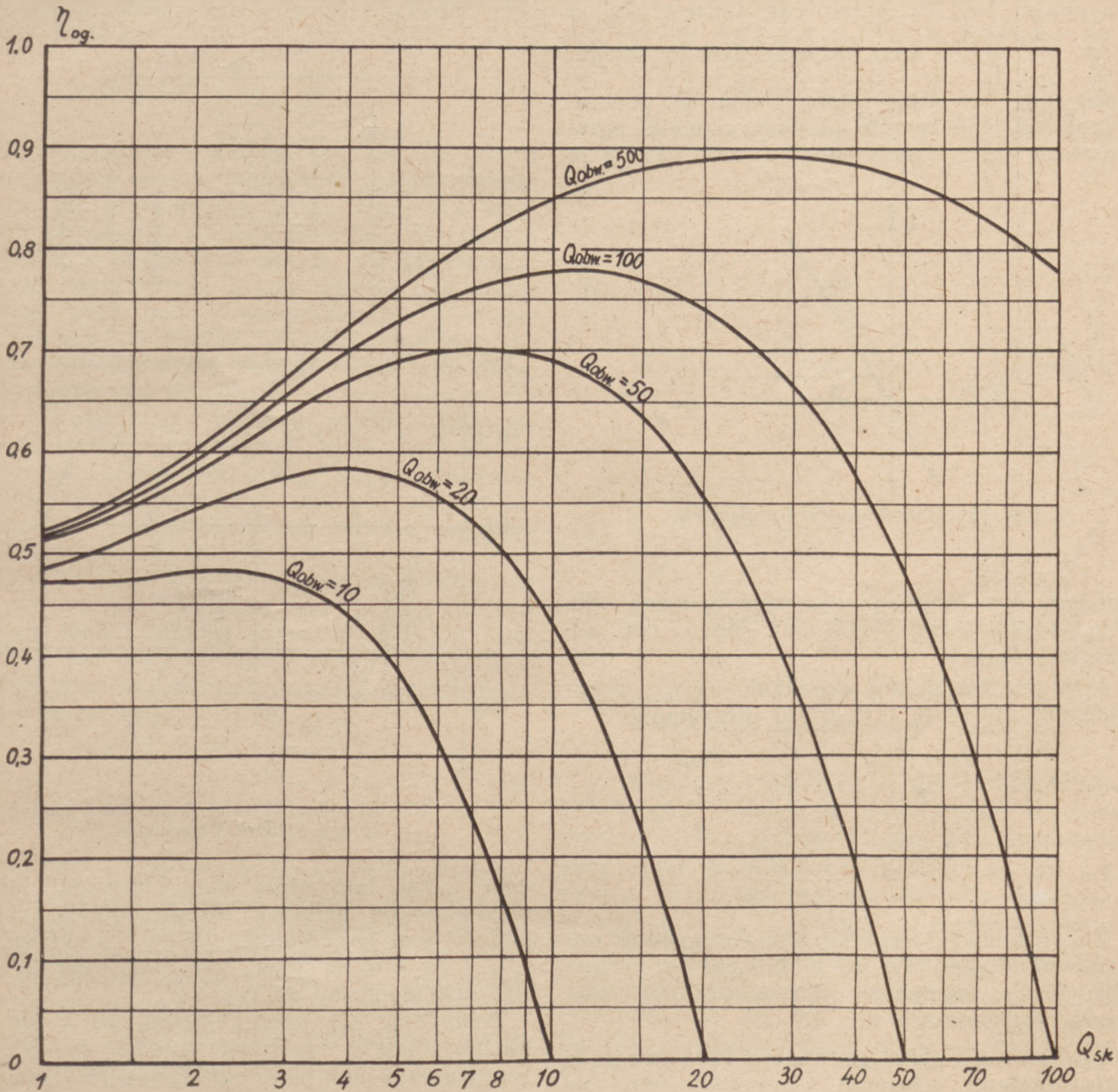
co pociąga za sobą zmniejszenie mocy generatora P_g, określonej w przybliżeniu przez wyrażenie:

$$P_g \cong \frac{U^2_{op}}{2 R_d} \tag{16}$$

Moc generatora możnaby oczywiście powiększyć, zwiększając odpowiednio napięcie U_{ba}.

wyłącznik działający synchronicznie z częstotliwością drgań obwodu generatora, przedstawiający — w stanie zamkniętym — stałą oporność r_L, w stanie zaś otwartym — oporność nieskończenie wielką. Charakterystykę takiego wyłącznika można narysować tak, jak na rys. 11.

Przedstawia ona prostą o nachyleniu ctg $\alpha = |r_L = \text{const.}$ dla wyłącznika zamkniętego,



Rys. 10. Zależność sprawności ogólnej generatora η_{og} od skutecznej dobroci obwodu Q_{sk}. dla różnych dobroci obwodu Q_0.

Niestety stosowane obecnie lampy generacyjne mają ściśle ograniczoną (przez swą budowę) wartość maksymalną napięcia anodowego. W tych warunkach oporność R_d obwodu drgań generatora ma dla danych warunków pracy i danej lampy ściśle określoną wartość optymalną.

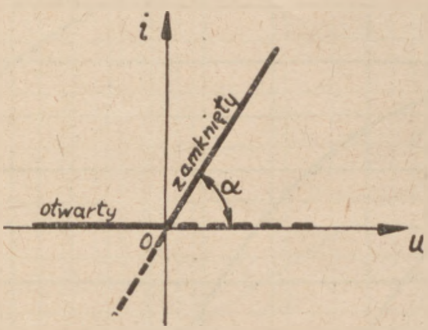
W dotychczasowych rozważaniach brano uproszczoną postać lampy generacyjnej: był to

dla otwartego zaś prostą o nachyleniu ctg $\alpha = \infty$. Jeżeli wyłącznik będzie synchronicznie zamykany i otwierany to, dla odpowiednich kierunków napięcia na jego zaciskach, charakterystyka może przebiegać jak pokazano linią pełną na rys. 11.

Dla lampy generacyjnej rzeczywistej np. triody, oporność jej r_L nie jest stała,

a zależy od chwilowych wartości napięć na siatce i anodzie lampy (dla stałych warunków pracy katody). Dobierając odpowiednio przebiegi chwilowe tych napięć, podczas przepływu prądu przez lampę, można wpływać na średnią wartość r_L, a więc i na sprawność generatora.

Należy tu zaznaczyć, że przez sprawność generatora lampowego rozumie się zwykle sprawność anodową lampy generacyjnej, tzn. przyjmuje się, iż sprawność ta jest równa $\eta_a = \frac{A_z - A_{sa}}{A_z}$ (por. wzór 2). Jest to uzasadnione tym, że straty mocy w lampie generacyjnej stanowią zwykle główny czynnik ograniczający moc danego generatora*), straty te



Rys. 11. Charakterystyka wyłącznika.

bowiem nie mogą przekroczyć pewnej, dla danej lampy ściśle określonej, mocy, tzw. admisyjnej P_{adm}.

Jeśli przekształcimy wyrażenie na η_a, wprowadzając moce: P_z i $P_{adm.}$, to otrzymamy:

$$\eta_a = \frac{P_z - P_{adm.}}{P_z} = 1 - \frac{P_{adm.}}{P_z};$$

$$P_z = \frac{P_{adm.}}{1 - \eta_a} = \frac{\text{const.}}{1 - \eta_a} \qquad (17)$$

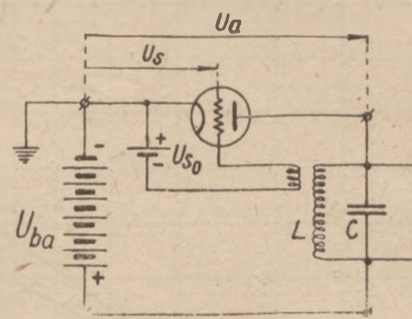
Z wyrażenia (17) wynika, iż wykorzystując odpowiednio lampę (P_{adm}) i *podnosząc jej sprawność pracy, powiększa się równocześnie moc użyteczną generatora.*

Uproszczony układ generatora lampowego ze wzbudzeniem własnym, przedstawiono na rys. 12. Chwilowe przebiegi napięć i prądów w tym układzie, dla sinusoidalnych napięć na siatce i anodzie lampy, przedstawia rys. 13.

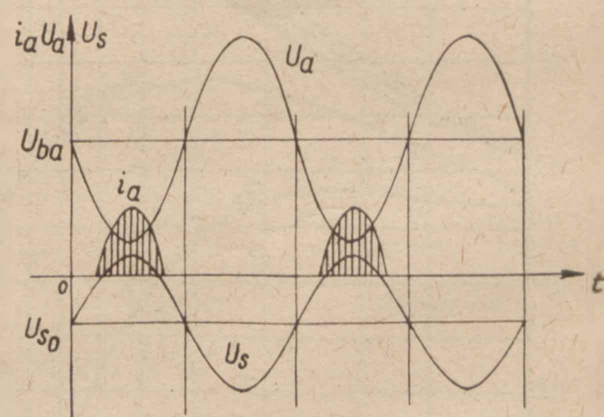
Jak widać z rysunku, prąd i_a płynie przez lampę w postaci impulsu, o czasie trwania wynoszącym pewną część okresu drgań. Czas trwania impulsu wyrażany bywa zwykle w stosunku do okresu drgań, za pomocą tzw. kąta przepływu Θ_a, mierzonego w stopniach (pełnemu okresowi odpowiada kąt 360°).

Oporność r_L, jaką przedstawia lampa podczas przepływu impulsu prądu i_a, nie jest stała, zależy ona bowiem od wartości chwilowych napięć na siatce (u_s) i na anodzie (u_a) lampy.

Wartości chwilowe oporności r_L można jednak określić zupełnie ściśle na podstawie charakterystyk lampy generacyjnej. Do tego



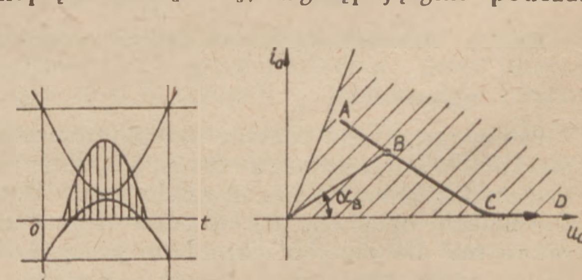
Rys. 12. Uproszczony układ generatora lampowego.



Rys. 13. Chwilowe przebiegi prądów i napięć w generatorze lampowym.

celu mogą być użyte charakterystyki lampy w dowolnym układzie współrzędnych, najdogodniej jest jednak stosować tu charakterystyki $i_a = f(u_a)$, $u_s = \text{const.}$, przedstawione w sposób schematyczny na rys. 14.

Posługując się charakterystykami z rys. 14, można znaleźć zależność między prądem i_a a napięciami u_a i u_s, występującymi podczas



Rys. 14. Przebieg linii roboczej w polu charakterystyk triody, dla sinusoidalnych przebiegów.

*) Jest to słuszne dla prawie wszystkich obecnie budowanych lamp generacyjnych.

pracy generatora. Zależność ta będzie wyrażona tzw. linią roboczą. Dla przebiegów sinusoidalnych na anodzie i siatce lampy generacyjnej, tak jak to przedstawia rys. 13, linia robocza będzie przebiegała tak jak krzywa *A B C D* na rys. 14. Oporność chwilowa r_L lampy będzie równa kotangensowi kąta, jaki tworzy wodząca danego punktu na linii roboczej z osią odciętych. Np. dla punktu *B*, określonego przez: u_{aB}, u_{sB}, i_{aB}, oporność lampy r_{LB} będzie:

$$r_{LB} = \mathrm{ctg}\,\alpha_B = \frac{u_{aB}}{i_{aB}} \qquad (18)$$

W generatorze posiadającym zamiast lampy generacyjnej idealny wyłącznik, było przyjmowane, że prąd płynie przez wyłącznik stromymi impulsami, o czasie trwania, który można pominąć wobec okresu drgań. W generatorze rzeczywistym przez lampę generacyjną może płynąć prąd, nie przewyższający zdolności emisyjnych jej katody. Wartość maksymalna prądu jest dla danej lampy ściśle określona, i nie może być przekroczona bez szkody dla niej. Wobec tego impulsy prądu, płynącego przez lampę generacyjną, mają ograniczoną wysokość, ażeby zaś pokryć zapotrzebowanie ładunku w kondensatorze obwodu, należy odpowiednio powiększyć czas trwania impulsu, czyli jego szerokość.

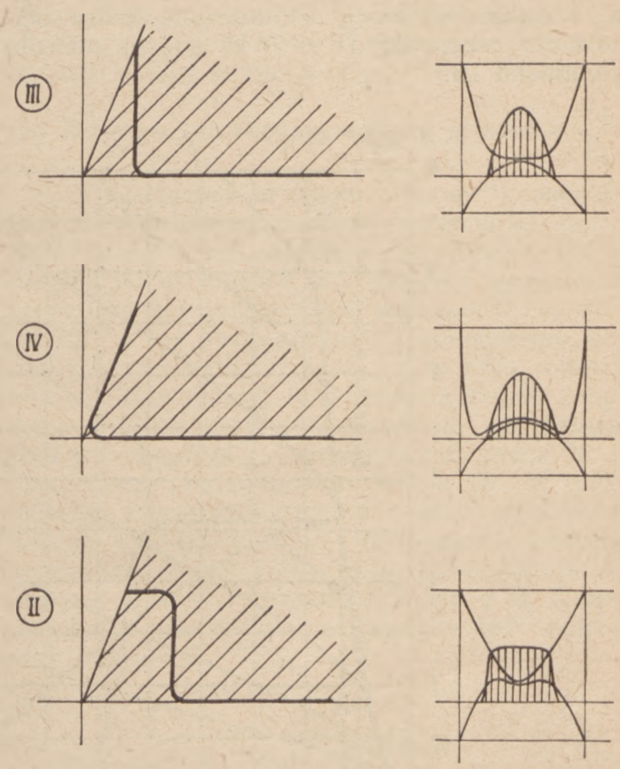
Czas trwania impulsu prądu w generatorze lampowym rzeczywistym nie może być pominięty wobec okresu drgań, a oporność lampy r_L, powinna być obliczona jako pewna średnia wartość oporności, występujących przez cały czas przepływu prądu:

$$r_L = \frac{1}{\Theta_a} \int_{(\Theta_a)} \frac{u_a}{i_a}\, d\,(\omega t) \qquad (19)$$

Wartość r_L można łatwo określić, posługując się charakterystykami lampy. Wartość ta, jak łatwo stwierdzić na podstawie rys. 14, zależy od położenia i kształtu linii roboczej w polu charakterystyk lampy. Im linia robocza będzie przebiegała bliżej charakterystyki $i_a = f\,(u_a)_{u_a = u_s}$, tym mniejszą oporność średnią r_L będzie przedstawiała lampa generacyjna. Najmniejszą oporność średnią lampy uzyskuje się dla linii roboczej przebiegającej wzdłuż charakterystyki $i_a = f\,(u_a)_{u_a = u_s}$, dla punktów bowiem leżących na tej charakterystyce, lampa przedstawia najmniejszą oporność, o wartości prawie stałej i równej kotangensowi kąta nachylenia tej charakterystyki.

Dla takiego przypadku oporność lampy generacyjnej można łatwo obliczyć na podstawie jej danych elektrycznych i wymiarów, przez co sprawność generatora może być łatwo określona.

Aby uzyskać inny przebieg linii roboczej, niż uwidoczniony na rys. 14, należy odkształcić odpowiednio napięcia na siatce i na anodzie lampy generacyjnej. Dla orientacji podano na rys. 15, tytułem przykładu, kilka charakterystycznych linii roboczych i odpowiadające im w przybliżeniu przebiegi napięć u_a i u_s.



Rys. 15. Typowe kształty linii roboczych i odpowiadające im przebiegi napięć i prądów.

Z rysunku 14 wynika, iż dla sinusoidalnych przebiegów napięć w generatorze oporność średnia r_L lampy generacyjnej jest stosunkowo największa, linia robocza bowiem w tym przypadku przebiega daleko od charakterystyki $i_a = f\,(u_a)_{u_a = u_s}$, przez co sprawność lampy η_a ma w tym przypadku wartość najmniejszą.

Inne przebiegi linii roboczych (II, III, IV) uwidocznione na rys. 15, są kolejno coraz bardziej korzystne, dając coraz większe sprawności.

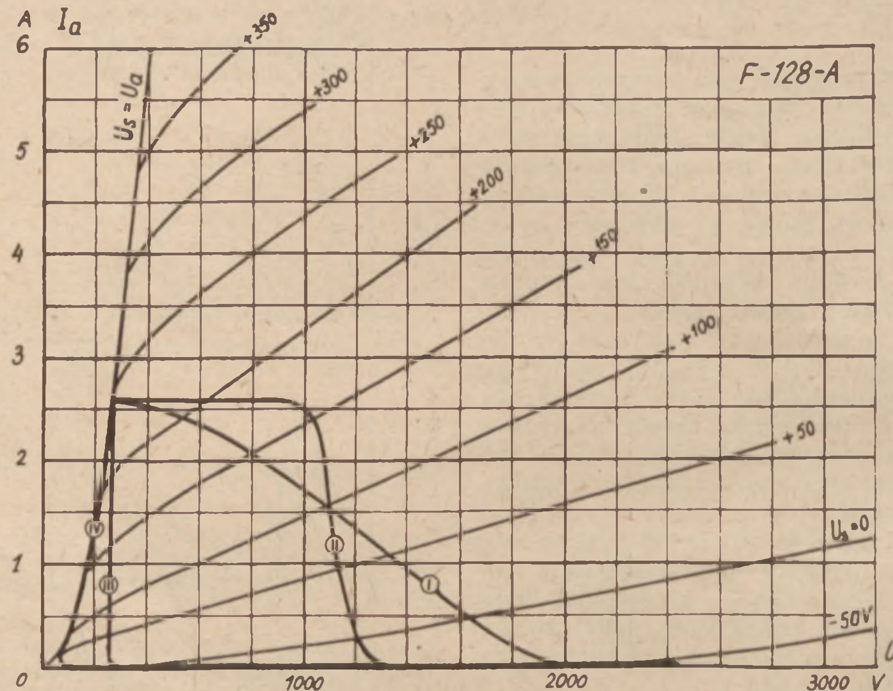
Aby zilustrować ilościowo poprawę sprawności generatora lampowego, jaką można uzyskać przez odpowiedni dobór linii roboczej, został przeliczony przykład praktyczny generatora z lampą F-128-A (wyrobu firmy Federal).

Charakterystyki statyczne tej lampy są przedstawione na rys. 16; na rysunku tym uwidoczniono również przebiegi linii roboczych: I, II, III i IV, dla których przeliczono sprawność. Wyniki tych przeliczeń podaje tabela 1.

Jak wynika z tabeli 1, w konkretnym przypadku generatora z lampą F-128-A, można

uzyskać zwiększenie sprawności o 5% względnie 11%, jeżeli przebieg linii roboczej będzie odpowiednio dobrany. Godnym zanotowania jest fakt że w obu przypadkach: III i IV wynik końcowy jest ten sam. Chociaż bowiem sprawność anodowa i moc użyteczna jest nieco większa w wypadku IV niż w przypadku III, to jednak zysk ten idzie całkowicie na pokrycie zwiększonej mocy wzbudzenia, która wynosi dla przypadku IV o 26 W więcej niż dla przypadku III.

Wartości sprawności podane w tabeli 1 odnoszą się do konkretnej lampy, w określonych warunkach jej pracy. Jest oczywiste, iż zmiana warunków pracy lampy, a więcej jeszcze zamiana samej lampy, może wpłynąć w pewnym stopniu na zmianę podanych wartości. Niemniej przeto na podstawie tabeli 1 można ocenić praktyczne zalety sposobów podwyższania sprawności przez odkształcenie napięć siatkowego względnie anodowego, czy obu równocześnie.



Rys. 16. Charakterystyki lampy F128A z naniesionymi typowymi liniami roboczymi.

TABELA 1.

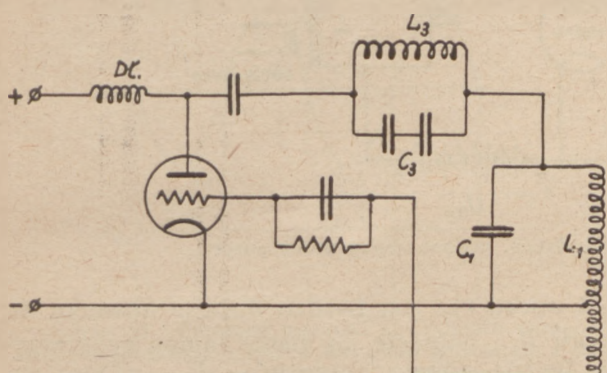
Moce i sprawności generatora z lampą typu F-128-A, obliczone na podstawie charakterystyk statycznych lampy, dla różnych przebiegów linii roboczej.

Kształt linii roboczej	Moc dostarczana do obwodu anodowego $P_{dost.}$ W	Moc tracona na anodzie lampy P_a W	Moc użyteczna w obwodzie drgań $P_{użyt.}$ W	Moc wzbudzenia $P_{wzb.}$ W	Sprawność $\frac{P_{użyt.}}{P_{dost.}}$ %	Sprawność $\frac{P_{użyt.} - P_{wzb.}}{P_{dost.}}$ %	Uwagi
I	2040	445	1595	60	79	74	Normalne warunki pracy lampy
II	2040	370	1670	53	82	79	Prostokątny impuls prądu
III	2040	175	1865	129	91.5	85	
IV	2040	155	1885	155	92,5	85	

4. Rozpatrzenie praktycznych układów generacyjnych z podwyższoną sprawnością

4.1. Układy generacyjne z odkształcaniem napięcia anodowego lampy generacyjnej

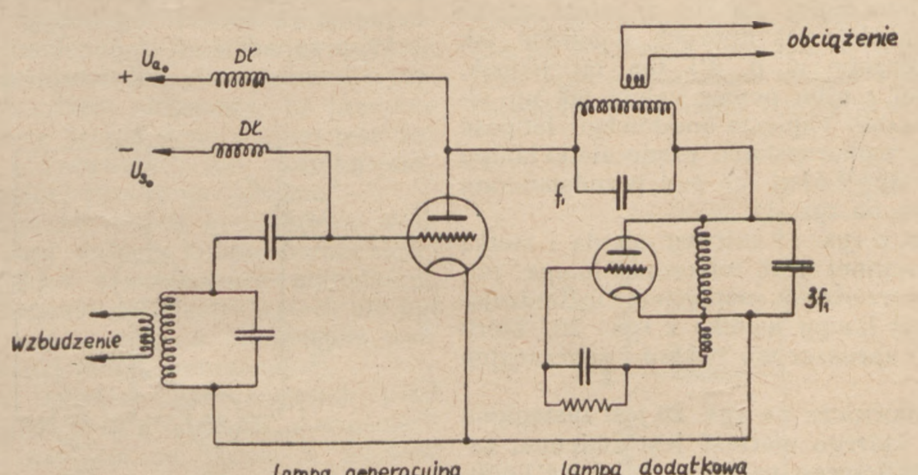
Sposób podwyższenia sprawności generatora lampowego, drogą odpowiedniego odkształcenia napięć na anodzie i siatce lampy generacyjnej jest w radiotechnice znany już od dawna *), praktycznie jednak zastosowano go stosunkowo późno[3]). Na ogół stosuje się przy tym tylko odkształcanie napięcia anodowego generatora, przez wprowadzenie w układ generatora obwodu drgań, nastrojonego na 3-cią harmoniczną częstotliwości podstawowej, a włączonego w szereg z głównym obwodem oscylacyjnym. Przykład schematu takiego generatora, zaczerpnięty z artykułu G. Babata i M. Łozińskiego [3]), przedstawiono na rys. 17.



Rys. 17. Układ generatora ze zwiększoną sprawnością (Babat i Łoziński).

Generator z rys. 17, służy do indukcyjnego ogrzewania przedmiotów stalowych w celu hartowania ich powierzchni. W obwodzie anodowym lampy generacyjnej znajdują się dwa obwody drgań: L_1 C_1 – obwód główny, nastrojony na częstotliwość podstawową i obwód L_3 C_3 – nastrojony na 3-cią harmoniczną. Obwód oscylacyjny L_3 C_3 jest obwodem o małych stratach, jego zaś oporność dynamiczna (wartość jej decyduje o amplitudzie 3 harmonicznej napięcia anodowego) jest odpowiednio dobrana, za pomocą wyboru stosunku $\frac{L_3}{C_3}$.

R. J. Sarbacher w swym artykule [4]), poświęconym zagadnieniu poprawy sprawności generatora lampowego, podaje kilka układów generacyjnych, w których do obwodu generatora częstotliwości podstawowej wprowadza się trzecią lub drugą harmoniczną ze specjalnego dodatkowego generatora, Ma to na celu zapewnienie odpowiedniej fazy napięcia trzeciej wzgl. drugiej harmonicznej w obwodzie generatora. Jeden z układów, proponowanych przez R. J. Sarbachera, przedstawiono na rys. 18. W praktycznym układzie tego typu (z lampą typu Gammatron HK54) uzyskano sprawność anodową generatora równą 87% i moc użyteczną 310 W, podczas gdy w zwykłym układzie z tą lampą optymalna wartość mocy wynosiła 167 watów, przy sprawności 78%.



Rys. 18. Układ generatora ze zwiększoną sprawnością (Sarbacher).

Autor podkreśla duże korzyści, jakie uzyskuje się tą drogą we wzmacniaczach harmonicznych.

4.2. Proponowany układ generatora z lampą dodatkową

Układy generacyjne, przedstawione na rys. 17 i 18, mają dużą sprawność dzięki odkształceniu napięcia anodowego lampy generacyjnej, przez wprowadzenie 3-ciej harmonicznej tego napię-

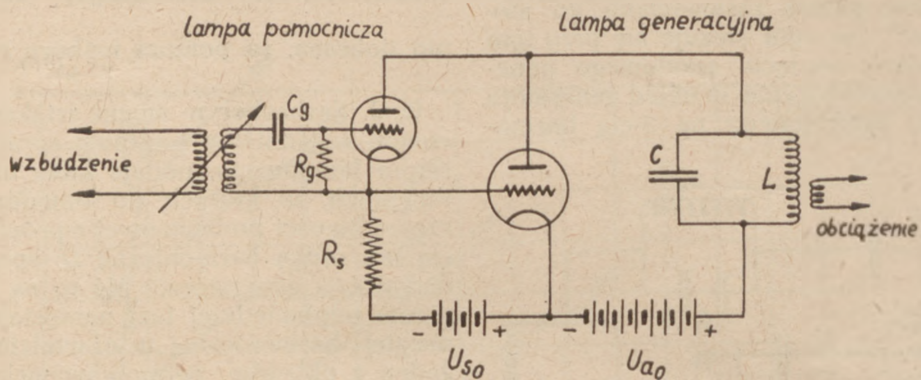
*) Patrz: J. Zenneck i H. Rukop, Lehrbuch der drahtlosen Telegraphie, 1925, str. 273.

J. Groszkowski, „Lampy katodowe oraz ich zastosowanie w radiotechnice" wyd. 1925, str. 215.

cia z odpowiednią amplitudą i fazą. Układy te można więc zaliczyć, ze względu na przebieg linii pracy, do układów typu III względnie IV (porównaj rys. 15 i 16).

Układ generacyjny o zwiększonej sprawności proponowany w niniejszej pracy jest w zasadzie układem typu II; w układzie tym bowiem napięcie anodowe nie jest odkształcone, ulega zaś odkształceniu napięcie na siatce lampy generacyjnej. Odkształcenie to jest tego rodzaju, blokowania prądu anodowego lampy), do pewnej wartości skończonej, zależnej od lampy i jej warunków pracy, w okresach przepływu prądu przez lampę.

Napięcie na siatce lampy generacyjnej jest pobierane z potencjometru, utworzonego z opornika R_s i oporu lampy pomocniczej r_{Lp}. Jeżeli wartość opornika R_s uczynimy dostatecznie dużą w stosunku do najmniejszej wartości chwilowej opornika r_{Lp} to, w momentach kiedy war-



Rys. 19. Układ generacyjny z lampą dodatkową, proponowany przez autora.

iż prąd anodowy lampy generacyjnej przybiera formę impulsu o kształcie prawie prostokątnym, przez co następuje skrócenie czasu trwania impulsu w porównaniu z czasem trwania impulsu cosinusoidalnego, a stąd wynikają mniejsze straty w lampie generacyjnej.

Układ proponowany, jak to choćby wynika z tabeli 1, nie daje tak dobrych wyników, jak układy przytoczone w p. 4.1 ma on jednak, w porównaniu z nimi pewne zalety jak np. sinusoidalny kształt napięcia anodowego, łatwość przestrajania, wykorzystanie prądu siatki lampy generacyjnej itp. Układ ten jest przedstawiony schematycznie na rys. 19.

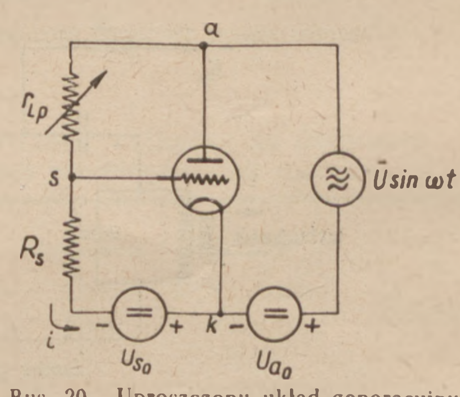
Jak wynika z rys. 19 między anodą i siatką lampy generacyjnej jest włączona lampa pomocnicza, rozrządzana napięciem wzbudzającym. Rola tej lampy wynika z rys. 20, który przedstawia uproszczony układ generacyjny z rys. 19.

Lampa pomocnicza na rys. 20 jest zastąpiona oporem r_{Lp}, którego wartość jest zmienna, zależnie od chwilowego napięcia na siatce i anodzie tej lampy.

Napięcie na anodzie lampy pomocniczej ma w każdej chwili wartość równą napięciu między siatką i anodą lampy generacyjnej, siatka zaś lampy pomocniczej uzyskuje napięcie zmienne wzbudzenia, nałożone na pewną wartość ujemnego napięcia stałego, powstającego na kondensatorze C_g (rys. 19). Lampa więc pomocnicza działa podobnie jak lampa generacyjna klasy C. Oporność r_{Lp}, jaką przedstawia ta lampa—między anodą i katodą — zmienia się od wartości nieskończenie wielkiej, dla okresów ujemnych potencjałów siatki (dostatecznie dużych dla za-

tość oporu r_{Lp} jest bardzo duża w stosunku do oporu R_s, napięcie na siatce lampy generacyjnej będzie równe napięciu $- U_{s0}$, w momentach zaś, kiedy opór r_{Lp} będzie dostatecznie mały wobec wartości oporu R_s, napięcie na siatce lampy generacyjnej będzie prawie równe napięciu na anodzie tej lampy.

W przypadku idealnym, kiedy wartość oporu r_{Lp} zmienia się od wartości nieskończenie

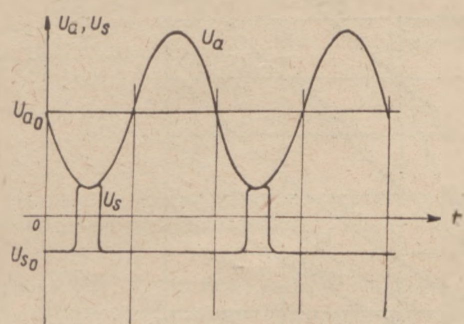


Rys. 20. Uproszczony układ generacyjny z lampą dodatkową.

dużej do wartości równej zeru, napięcie chwilowe na siatce lampy generacyjnej będzie przebiegać, jak na rys. 21.

W tym przypadku lampa generacyjna pracowałaby w najbardziej korzystnych warunkach ze względu na straty w anodzie, podczas bowiem przepływu prądu przez nią oporność jej byłaby najmniejsza. Warunki takie nie mogą być jednak zrealizowane w praktyce ze względu na ograniczony prąd emisyjny katody.

Oporność lampy pomocniczej można zmieniać—jak to było wyjaśnione w p. 3.5 — od wartości dowolnie dużej do wartości określonej nachyleniem jej charakterystyki $i_a = f(u_a)_{u_s = u_{s0}}$. Przebieg chwilowych wartości tej oporności można dowolnie dobierać przez odpowiedni dobór linii pracy lampy, czyli przez dobór przebiegów chwilowych napięć na siatce i anodzie lampy. Jeśli więc w układzie z rys. 19, wartość oporu R^s będzie np. 10-krotnie większa niż oporność lampy pomocniczej, określona nachyleniem jej charakterystyki $i_a = f(u_a)_{u_s = u_{s0}}$, to dobierając odpowiednio wzbudzenie lampy pomocniczej, można uzyskać taki kształt napięcia na siatce lampy generacyjnej, że kształt



Rys. 21. Przebieg wartości chwilowych napięć anodowego i siatkowego w układzie generatora z lampą pomocniczą w przypadku idealnym.

impulsu prądu anodowego, płynącego przez tą lampę będzie zbliżony do prostokątnego. Jeżeli nawet przebiegi w lampie pomocniczej są sinusoidalne (takie np. jak przedstawia ogólnie rys. 13), a więc kształt impulsu przez nią płynącego jest odcinkiem sinusoidy, to przebieg napięcia na siatce lampy generacyjnej jest już odkształcony, a „otwarcie" lub „zamknięcie" lampy generacyjnej przebiega „stromo".

W układach praktycznych generatorów według rys. 19, przy dobrze lampy pomocniczej i oporu R_s trzeba się kierować czynnikiem, który w dotychczasowych rozważaniach nie był wcale brany pod uwagę, a mianowicie wartością prądu siatki lampy generacyjnej.

W zwykłych triodach generacyjnych prąd siatki płynie tylko przy dodatnich wartościach (wzgl. katody) napięcia na siatce, a wartość jego zależy od wymiarów siatki i anody lampy i od wartości napięć na tych elektrodach. Rozpływ prądu emisyjnego między anodą i siatką, może być zupełnie zmieniony na skutek zjawiska emisji wtórnej elektrod. Wartość prądu siatki, płynącego w lampie generacyjnej, najlepiej określić na podstawie jej charakterystyk, jeśli tych nie ma, to można przyjąć iż, dla $u_a = u_s$ prąd siatkowy i_s wynosi od 0,15 do 0,30 prądu i_a.

Jeśli więc rozpatrzyć układ generacyjny z rys. 19, to łatwo zauważyć, że dla dodatnich napięć chwilowych na siatce lampy generacyjnej — prąd siatkowy tej lampy będzie płynąć poprzez lampę pomocniczą. Układ zastępczy generatora przedstawi się więc — dla dodatnich wartości chwilowego napięcia siatki lampy generacyjnej — jak na rys. 22.

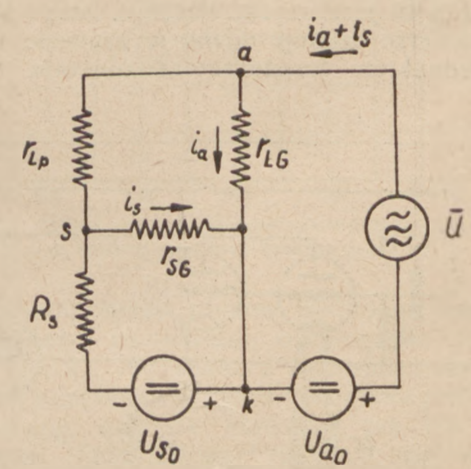
Na tym rysunku r_{sG} oznacza opór między siatką, a katodą lampy generacyjnej, który powstaje na skutek przepływu prądu emisyjnego do siatki. Wartość tego oporu nie jest stała, zależy bowiem—tak jak opór r_{Lp} czy r_{LG} — od wartości chwilowych napięć na siatce i anodzie lampy generacyjnej. Wartość chwilową tego oporu można określić na podstawie charakterystyk $i_s = f(u_s)$. Rodzina takich charakterystyk dla lampy *F-128-A* przedstawiona jest na rys. 23.

Z rys. 22 wynika, iż dla uzyskania odpowiedniego przebiegu napięcia na siatce lampy generacyjnej należy nie tylko dobrać odpowiednio wartość R_s w stosunku do oporności lampy pomocniczej r_{Lp}, lecz również należy oporność lampy r_{Lp} dobrać tak, aby była ona dostatecznie mała wobec oporu r_{sG}. Napięcie bowiem chwilowe $u_{s\ przepl.}$ na siatce lampy generacyjnej podczas przepływu przez nią impulsu prądu siatki będzie:

$$u_{s\ przepl.} = u_a \cdot \frac{r_{sG}}{r_{Lp} + r_{sG}} \tag{23}$$

(w założeniu, że $R_s \gg r_{sG}$).

Warunek $u_{s\ przepl.} \cong u_a$ może być tu tylko wtedy spełniony, kiedy będzie $r_{Lp} \ll r_{sG}$. Oznacza to, że lampa pomocnicza winna przepuszczać przy stosunkowo małym spadku napięcia całkowity prąd siatki lampy generacyjnej.



Rys. 22. Uproszczony układ zastępczy generatora z lampą dodatkową.

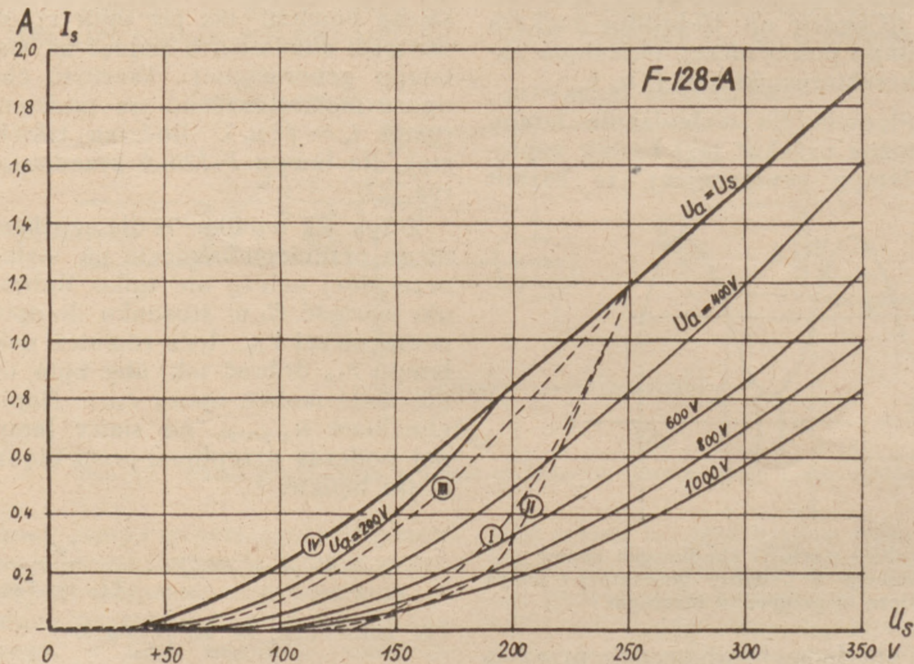
Na podstawie powyższych rozważań można wysnuć warunki, jakim winna odpowiadać lampa pomocnicza. Warunki te są następujące: a) prąd emisyjny lampy pomocniczej winien być rzędu 0,15 — 0,3 prądu lampy generacyj-

nej, b) dopuszczalne napięcie anodowe winno być o wartości takiej samej, jak dla lampy generacyjnej, wreszcie c) jak najmniejsza oporność lampy.

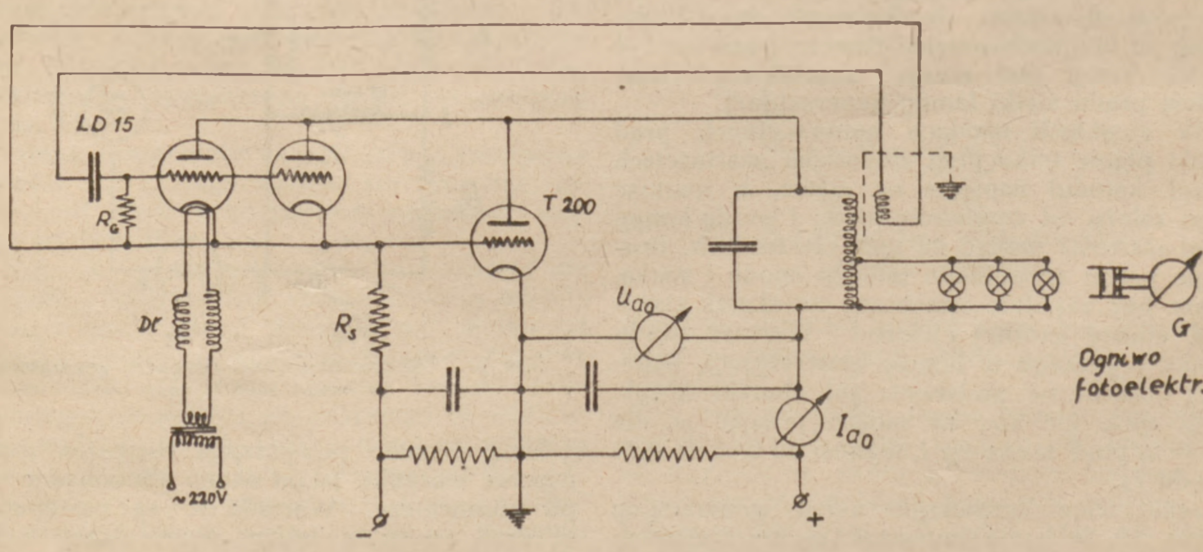
Warunki powyższe trudno jest spełnić przy pomocy normalnych typów lamp generacyjnych. Jedynie lampy przystosowane do pracy impulsowej, ostatnio wprowadzone do urządzeń radiotechnicznych, mogą nadawać się dobrze do powyższego celu.

Należy tu jeszcze zaznaczyć, iż lampa pomocnicza, bierze czynny udział w procesie zasilania ładunkiem kondensatora obwodu drgań, prąd bowiem płynący przez nią, a stanowiący zarazem prąd siatkowy lampy generacyjnej, płynie teraz przez obwód drgań tak, jak prąd anodowy lampy generacyjnej.

Lampa więc generacyjna, dzięki lampie pomocniczej, jest prądowo całkowicie wykorzystana, tzn. dla obliczenia mocy wydzielonej w obwodzie drgań, należy brać całkowity impuls prądu emisyjnego ($i_a + i_s$) lampy generacyjnej, uwzględniając jednak okoliczność, że prąd siatki lampy generacyjnej płynie po przez lampę pomocniczą, powodując w niej stratę energii.



Rys. 23. Charakterystyki prądu siatkowego lampy F-128-A oraz linie robocze obwodu siatki.

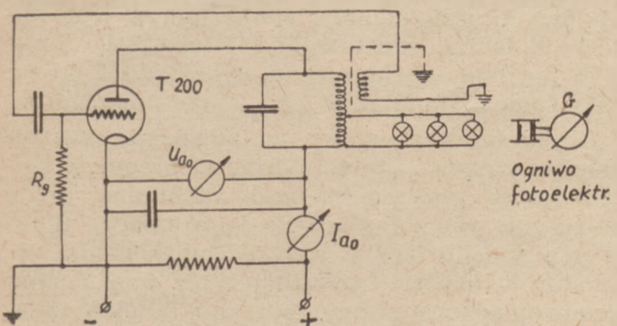


Rys. 24. Schemat zbadanego laboratoryjnie generatora samowzbudnego z lampą dodatkową.

4.3. Badania generatorów z lampą pomocniczą

Celem eksperymentalnego sprawdzenia działania układu generacyjnego z lampą pomocniczą zbadano, zestawione laboratoryjnie, dwa generatory samowzbudne, zaopatrzone w taką lampę.

Jeden z tych generatorów, o układzie przedstawionym na rys. 24 posiadał lampę genera-



Rys. 25. Schemat zwykłego generatora samowzbudnego, zbadany porównawczo z układem z rys. 24.

cyjną typu *T200*, rolę zaś lampy pomocniczej spełniały dwie połączone równolegle triody *LD15*.

Obwód oscylacyjny generatora był utworzony z cewki o dobroci $Q = 450$ i kondensatora powietrznego. Obwód ten był obciążony optymalnie za pomocą żarówek dołączonych do zaczepów cewki.

Warunki zasilania generatora były dobrane tak, jak tego wymagały normalne warunki pracy lampy, według danych katalogowych.

Wartość napięcia siatkowego lampy pomocniczej i wartość oporu upływowego jej statki R_g dobrano optymalnie, jak również wartość oporu R_s ($50\ k\Omega$) i napięcia U_{so} ($-280\ V$) siatki lampy generacyjnej.

Moc użyteczną generatora $P_{uż}$ określano jako moc wydzielaną w żarówkach, dołączonych do obwodu. W tym celu żarówki były przecechowane uprzednio prądem zmiennym 50 c/s, za pośrednictwem ogniwa fotoelektrycznego.

Dla kilku punktów pracy w okolicy maksymalnej wartości napięcia anodowego zmierzono moc metodą termometryczną, uzyskując wyniki zgodne z metodą fotoelektryczną.

Sprawność generatora określano jako stosunek mocy użytecznej, wydzielanej w żarówkach, do mocy pobranej ze źródła napięcia anodowego lampy.

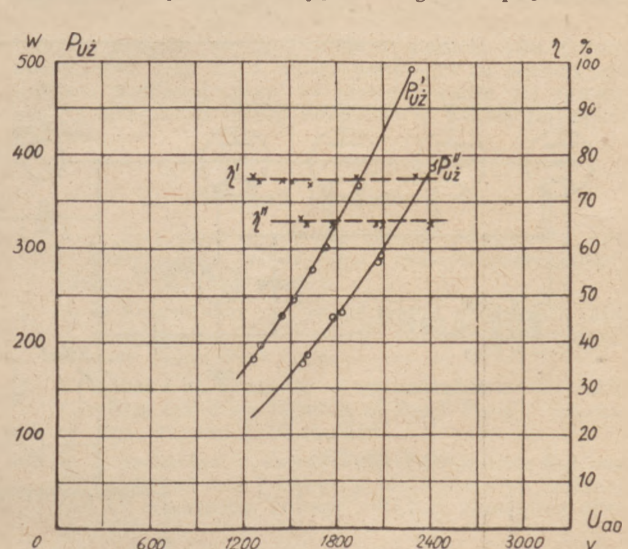
Aby określić zalety układu z lampą pomocniczą w stosunku do generatorą zwykłego, zbadano również układ generacyjny przedstawiony na rys. 25. Lampa generacyjna i wszystkie elementy tego układu były *te same*, co w układzie z rys. 24.

Układ z rys. 25 przedstawia zwykły generator samowzbudny w układzie Meissnera. Warunki zasilania lampy generacyjnej w tym układzie były takie same jak w układzie z rys. 24. Opór siatkowy R_g ($30\ k\Omega$) i napięcie wzbudzenia dobrano optymalnie.

Na rysunku 26 podano wyniki uzyskane w obu powyższych układach: krzywe $P'_{uż}$ i η' odnoszą się do generatora z lampą dodatkową, krzywe zaś $P''_{uż}$ i η'' do generatora zwykłego.

Z porównania krzywych podanych na rys. 26 wynika, iż generator z lampą pomocniczą daje, w tych samych warunkach pracy, większą sprawność i większą moc niż generator zwykły. W typowych warunkach pracy np. sprawność generatora z lampą pomocniczą wynosiła około 75% moc zaś użyteczna około 500 W, podczas gdy w układzie zwykłym sprawność nie przekraczała 66% moc zaś maksymalna nie była większa od 400 W.

Dla wyjaśnienia mechanizmu działania lampy pomocniczej przeprowadzono w układzie z rys. 24, obserwacje napięć zmiennych na siatce i na anodzie lampy generacyjnej za pomocą oscylografu. Zastosowano przy tym oscylograf dwustrumieniowy, który zezwalał na równoczesną obserwację obu tych napięć.

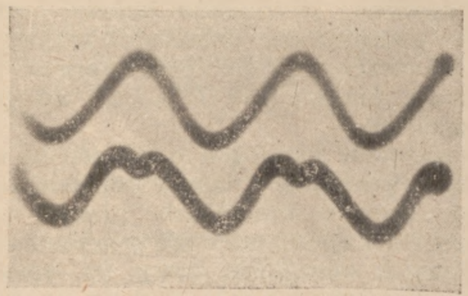


Rys. 26. Moc i sprawność generatotów z rys. 23 i 24 w funkcji napięcia anodowego.

Zdjęcia typowego obrazu przebiegu napięć, uzyskiwanego na ekranie oscylografu, przedstawia rys. 27. Jak widać z fotografii, napięcie anodowe generatora (krzywa górna) ma przebieg sinusoidalny, napięcie siatkowe zaś jest odkształcone. Odkształcenie napięcia siatkowego przypada na moment przepływu prądu przez lampę generacyjną *).

*) Przy interpretacji zdjęcia z rys. 27 należy wziąć pod uwagę, że jedna z krzywych winna być przesunięta w fazie o 180° względem drugiej krzywej. Oscylograf zastosowany nie dopuszcza bowiem całkowicie niezależnej obserwacji dwóch napięć (jeden punkt układu musi być wspólny).

Odkształcenie napięcia siatkowego lampy generacyjnej jakie przedstawia fotografia na rys. 27, można porównać z teoretycznie przewidywanym odkształceniem, uwidocznionym na



Rys. 27. Chwilowy przebieg napięcia anodowego i napięcia siatkowego w lampie generacyjnej w układzie z rys. 24.

rys. 21. Jak wynika z porównania obu tych rysunków przebieg rzeczywisty jest bardzo złagodzony, co jest wynikiem pojemności własnych lampy i układu jak również nieidealnym działaniem lampy pomocniczej.

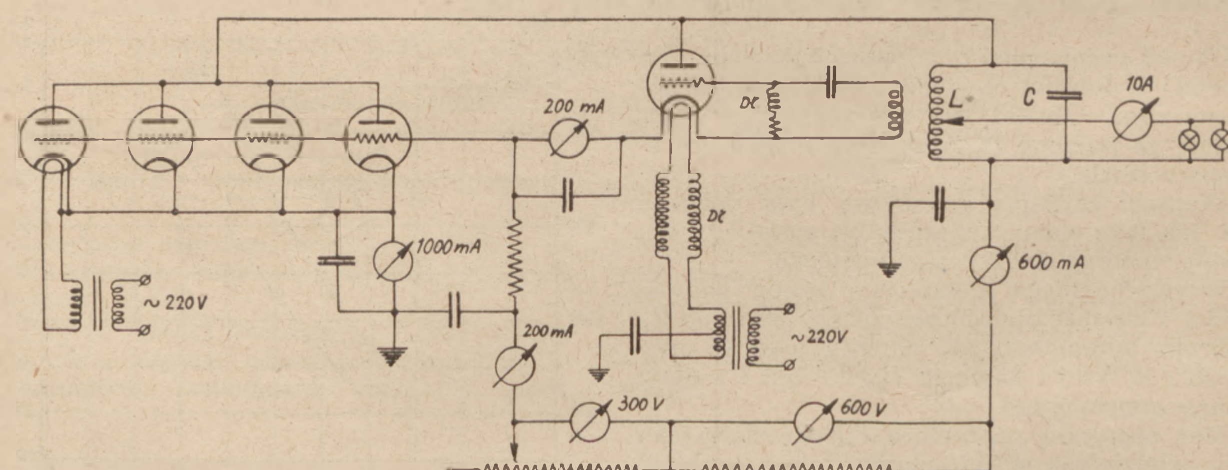
Inny układ generacyjny, który został zbadany eksperymentalnie, przedstawiony jest schematycznie na rys. 28. Układ ten różnił się tym od poprzedniego, że lampa pomocnicza była tego samego typu, co lampa generacyjna.

Koncepcja takiego wykorzystania lampy staje się zrozumiała, jeśli wziąć pod uwagę, że lampa pomocnicza pracuje w podobnych warunkach, co lampa generacyjna z tą różnicą, że prąd przez nią płynący stanowi tylko część prądu lampy generacyjnej, a mianowicie tylko prąd siatkowy tej lampy.

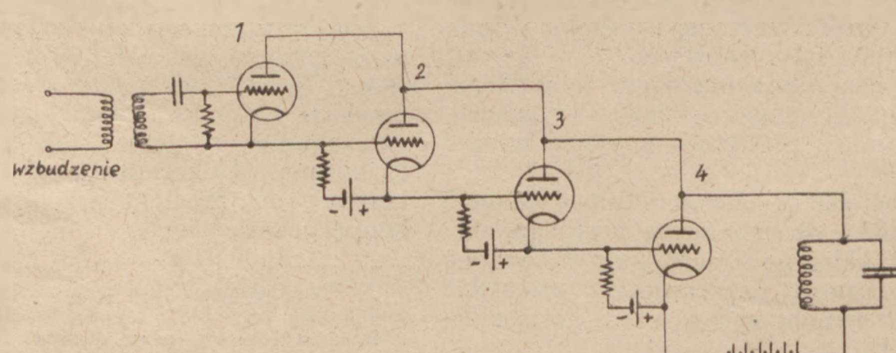
Jeśli w normalnych warunkach pracy lampy generacyjnej danego typu, rozdział prądu emisyjnego między anodę i siatkę lampy jest np. 4 : 1, to łącząc równolegle 4 lampy tego typu w jedną lampę generacyjną, należy jedną lampę tego samego typu użyć jako lampę pomocniczą.

Generator zestawiony w powyższy sposób należy porównać z generatorem zwykłym, w którym lampa generacyjna jest utworzona przez połączenie równoległe 5-ciu lamp danego typu. W ten sposób można uzyskać porównanie generatorów bardziej miarodajne niż porównanie przeprowadzone poprzednio, oba bowiem układy generacyjne mają taką samą ilość lamp.

Dla przeprowadzenia opisanego powyżej porównania generatorów zastosowano lampy generacyjne typu *RL12 T15*. Rozdział prądu



Rys. 28. Układ generacyjny, w którym lampa pomocnicza jest tego samego typu co lampa generacyjna.



Rys. 29. Ideowy układ wzmacniacza. w. cz. bez obwodów strojonych w stopniach pośrednich.

emisyjnego między anodę i siatkę tego typu lampy wynosi od 3,5 : 1 do 4 : 1, użyto więc 4 lampy równolegle połączone jako generacyjne, piątą zaś jako pomocniczą.

Układ generatora badanego przedstawia rys. 28. Obwód oscylacyjny posiadał dobroć $Q_0 = 80$. Częstotliwość pracy generatora wynosiła 100 kc/s.

Moc użyteczną generatora mierzono za pomocą amperomierza cieplnego, włączonego w obwód żarówek, dołączonych do zaczepów cewki obwodu dgrań.

Układ amperomierz — żarówki był uprzednio przeskalowany prądem 50 c/s. Sprawność generatora określono ze stosunku mocy użytecznej do mocy pobranej źródła napięcia anodowego.

W układzie tym po optymalnym dobraniu warunków pracy uzyskano moc użyteczną 95 W przy sprawności 59%.

Zestawiony z tych samych elementów układ generacyjny zwykły, w którym zachowano te same co w poprzednim warunki zasilania anodowego lamp, dał w najoptymalniejszych warunkach pracy moc 85 W ze sprawnością 53%.

Jak wynika z przedstawionych wyników eksperymentalnego badania generatora z lampą pomocniczą, lampa ta istotnie usprawnia pracę lampy generacyjnej. Usprawnienie to polega nie tylko na zmniejszeniu strat w lampie generacyjnej, lecz również na zmniejszeniu strat związanych z procesem wzbudzania lampy generacyjnej. Moc wzbudzenia, która w generatorze samowzbudnym jest pobierana z obwodu drgań, a tracona na siatce lampy i w oporze upływowym siatki (a ewent. również w baterii dostarczającej napięcia ujemnego siatce), stanowi zwykle kilka % (dla triod około 10%) mocy użytecznej generatora (porównaj tabelę 1). Mocy tej musi oczywiście dostarczyć bateria zasilająca, lecz za pośrednictwem lampy generacyjnej i obwodu drgań.

W układzie z lampą pomocniczą, bateria zasilająca dostarcza energii do wzbudzenia generatora, lecz za pośrednictwem lampy pomocniczej. Wprawdzie z obwodu drgań brana jest energia dla wzbudzenia lampy pomocniczej, lecz energia ta, jak wynika z układu, jest kilkakrotnie mniejsza niż w generatorze zwykłym. Okoliczność powyższa ma też pewien wpływ na zwiększenie sprawności generatorów z lampą pomocniczą.

Jest do pomyślenia układ wzmacniacza mocy, w którym wykorzystana byłaby powyższa zasada do wzbudzenia kolejnych stopni wzmacniacza. Układ taki nie zawierałby obwodów oscylacyjnych w poszczególnych stopniach wzmacniacza, za wyjątkiem stopnia końcowego. Zalety takiego wzmacniacza polegałyby nie tylko na zwiększonej sprawności, lecz również na prostocie strojenia układu. Ideowy schemat takiego wzmacniacza jest przedstawiony na rys. 29. W układzie tym lampy w kolejnych stopniach winny być tak dobrane, aby każda z nich przepuszczała prąd siatkowy lampy następującej za nią.

Prostota układu wzmacniacza wg rys. 29 musiałaby być jednak okupiona koniecznością wzajemnego izolowania obwodów żarzenia każdej z lamp i koniecznością stosowania dławików w. cz. w tych obwodach, zapobiegających upływom energii w. cz.

Warunki te nie są łatwe do spełnienia w układach praktycznych, chociaż niekiedy prostota układu musi ustąpić warunkowi bardziej ekonomicznej eksploatacji.

Ten ostatni wzgląd obowiązuje również dla układów generacyjnych ze zwiększoną sprawnością rozpatrzonych uprzednio. Jeśli jednak korzyści, jakie daje zwiększenie mocy i sprawności generatora, są bardzo pożądane, układy te mogą znaleźć zastosowania techniczne mimo skomplikowanej budowy.

Podziękowanie

Autor pragnie na tym miejscu wyrazić swą gorącą wdzięczność Prof. Dr J. Groszkowskiemu za zachętę do podjęcia niniejszej pracy, za sformułowanie jej tematu oraz za wskazówki i rady udzielone w trakcie jej wykonywania.

Wykaz literatury

1. J. N. Fomiczew — „Nowyj sposob powyszenia kpd i uwieliczenia moszczności radiopieredatczykow". Elektroświaź 1938 zesz. 6.
2. A. J. Kolesnikow — „Nowyj metod powyszenia kpd i uwieliczenia moszczności radiopieredatczykow". Mastier świazi 1940 Nr 6.
3. G. Babat i M. Losinsky — „Concentrator of Eddy Currents for Zone Heating of Steel Parts". Journal of App. Physics 1940 str. 816.
4. R. J. Sarbacher — „Power-Tube Performance in Class C Amplifiers and Frequency Multipliers as Influenced by Harmonics Voltage". P.I.R.E. November 1943 str. 607.
5. H. C. Humprey — „Electronic Tin Fusion". P.I.R.E., 1944, str. 60.
6. H. Stockman — „Power Efficiency of R-f Power Amplifier Stages" Electronics 1944, July.
7. H. Stockman — „The Validity of the E.P.C. Theorem for Power Calculations". P.I.R.E., June 1944.
8. E. U. Condon — „Microwave Generators Using Velocity Modulated Beam" Proc. Nat. Electr. Conf. Vol. 1, 1945 str. 500.
9. V. Wouk — „Energy Wasted in Charging a Condenser" Communications April 1944, str. 48.
10. D. Gabor — „Energy Conversion in Electronic Devices" The J.I.E.E. 1944, str. 128.
11. F. F. Offner — „The Efect of Q on Power Amplifiers Efficiency". P.I.R.E., November 1946, str. 896-8.
12. Z. J. Model, W. J. Iwanow, S. W. Person, G. F. Sołowiew — „O powyszeni KPD moszcznogo wysokoczastotnogo łampowego genieratora putiem wydielenia tretiej garmoniczeskoj". Radiotechnika 1947, Nr 4, str. 15.

INŻ. ANTONI CZECHOWSKI

Szczególne zastosowania układów Π *)

STRESZCZENIE

Rozpatrzono układy do neutralizacji z dzielonym obwodem, układ do powielania częstotliwości i odwracania fazy; na podstawie wniosków, wyprowadzonych w poprzednich artykułach o układach π1 i π6, w prosty sposób wykazano, które układy są właściwe, a które nie. Przeprowadzono proste porównanie oscylatorów Colpitt'a i Hartley'a co do stałości częstotliwości w tych samych warunkach.

Particular Applications of π – Networks

SUMMARY

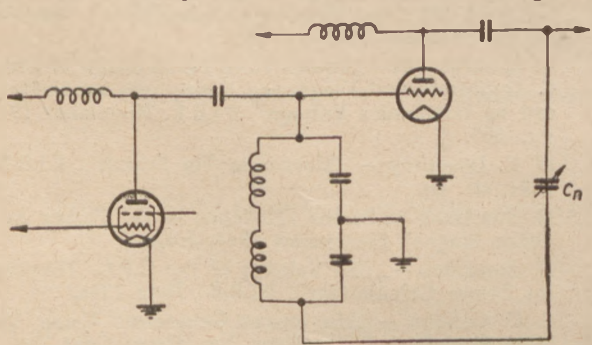
Split neutralizing networks, frequency multiplier and phase splitter are discussed. Refering to his previous articles the author points out merits and disadvantages of those networks. The comparison between Colpitts and Hartley oscillators, concerning their frequency stability in the same conditions, is given.

1. Wstęp

W artykułach poprzednich [3]) [4]) **) omówiono układy π w zastosowaniu do stopni końcowych w urządzeniach radionadawczych. Jest jednak rzeczą oczywistą, że otrzymane tam wyniki i wnioski można rozszerzyć na układy stopni pośrednich. Poniżej podano trzy przykłady takiego rozszerzenia wniosków, gdzie specyficzne przedstawienie układów — nawet dobrze znanych—pozwala łatwo ocenić, czy układ jest właściwie stosowany.

2. Zastosowanie układu π w układzie neutralizacyjnym

Powszechnie jest znany układ neutralizacyjny przedstawiony na rys. 1. Zostanie wykazane, że układ taki jest bardzo nieekonomiczny.

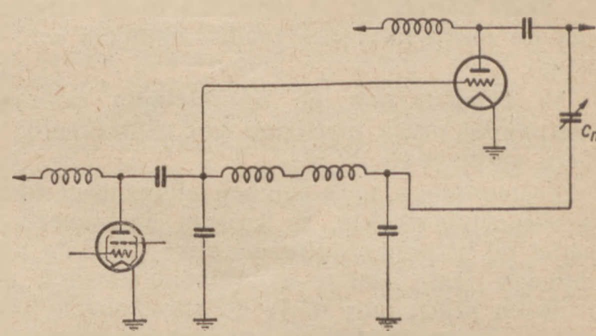


Rys. 1. Układ neutralizacyjny z dzielonym kondensatorem w obwodzie siatki. Połączenie siatki z obwodem rezonansowym jest niewłaściwe.

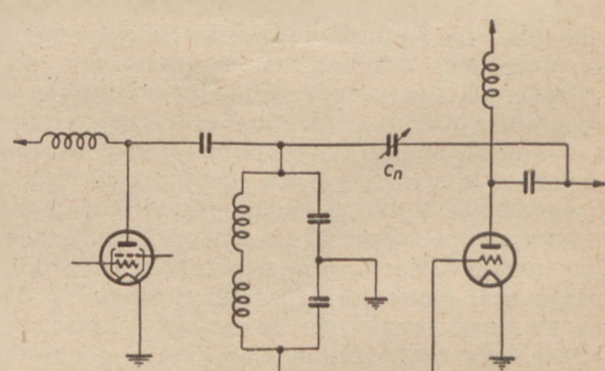
Wystarczy ten sam układ przedstawić jak na rys. 2 i wtedy dla każdego staje się oczywiste, że układ jest niewykorzystany, bo napięcie wyjściowe układu, czyli dobrze wyfiltrowane, jest użyte dla neutralizacji, a napięcie istniejące na wejściu filtru, czyli słabo wyfiltrowane, jest podane na siatkę następnej lampy.

Prawidłowy układ neutralizacyjny, z wykorzystaniem wybitnych właściwości filtracyjnych układu π1, podany jest na rys. 3 i rys. 4. (Oba rysunki są sobie równoważne).

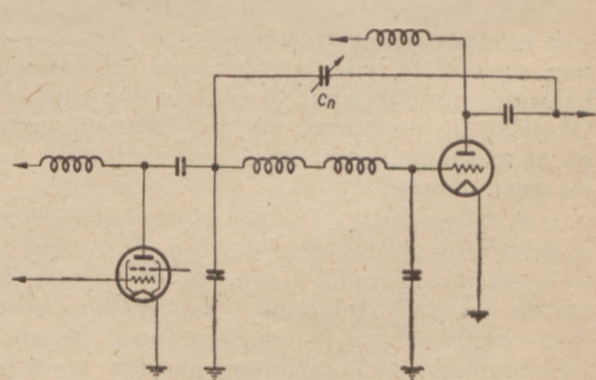
Należy zwrócić uwagę, że układ neutralizacyjny z rys. 4 pracuje często przy dopasowa-



Rys. 2. Układ, jak na rys. 1 — obwód rezonansowy jest przedstawiony jako obwod typu π.



Rys. 3. Układ neutralizacyjny z dzielonym kondensatorem w obwodzie siatki przy właściwym połączeniu siatki z obwodem rezonansowym.



Rys. 4. Układ jak na rys. 3 z przedstawieniem obwodu rezonansowego jako obwodu π 1.

*) Artykuł zgłoszony do red. 21.5.48.

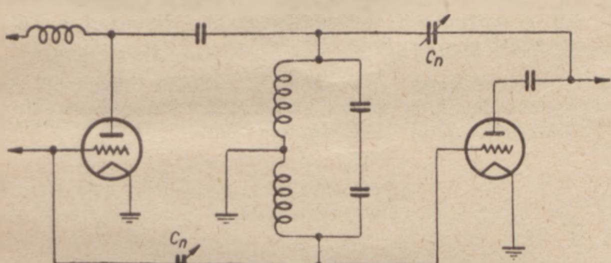
**) Cyfry w odnośnikach oznaczają pozycje wykazu literatury.

niu $R_o = r$, czyli zawartość drugiej harmonicznej wyrazi się:

$$\left|\frac{\hat{I}_{RII}}{\hat{I}_{RI}}\right| \simeq \frac{I_{aII}}{I_{aI}} \cdot \frac{1}{12\,Q} \qquad 2.1$$

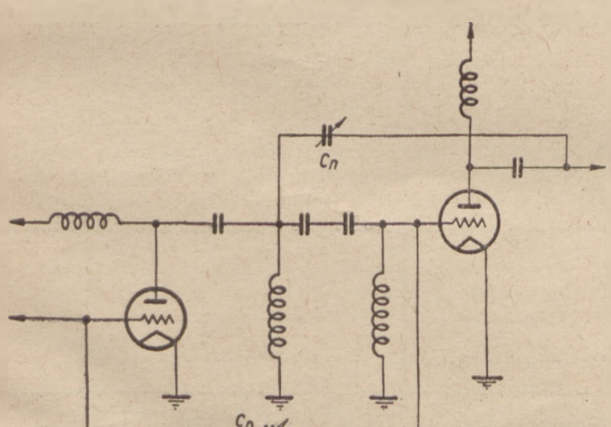
Zatem przy kącie przepływu $\frac{\Theta}{2} = 70^{\circ}$ wystarczy zastosowanie $Q = 3{,}3$, by siatka następnej lampy była zasilana napięciem o zawartości drugiej harmonicznej 1%. Należy zatem nie tylko pomiętać o tym, że układ z rys. 1 jest niewłaściwy—bo niewykorzystany, a z rys. 3 jest dobry, ale że można stosować współczynnik przepięcia obwodu $Q = 3 \div 5$; wtedy układ neutralizacyjny będzie o małej kubaturze i tani.

Czasem wydaje się korzystniejszy ze względów konstrukcyjnych układ z uziemionym środkiem cewki, czyli układ jak na rys. 5.



Rys. 5. Układ neutralizacyjny z dzieloną cewką w obwodzie siatki.

Ten sam układ jest przedstawiony na rys. 6. Widać, że jest to układ π 6.



Rys. 6. Ten sam układ, jak na rys. 5, tylko obwód rezonansowy jest przedstawiony jako obwód typu π 6.

Przy dopasowaniu $R_o = r$ zawartość drugiej harmonicznej wyraża się wzorem:

$$\left|\frac{\hat{I}_{RII}}{\hat{I}_{RI}}\right| \simeq \frac{I_{aII}}{I_{aI}} \cdot \frac{4}{3\,Q} \qquad 2.2$$

a zawartość trzeciej harmonicznej:

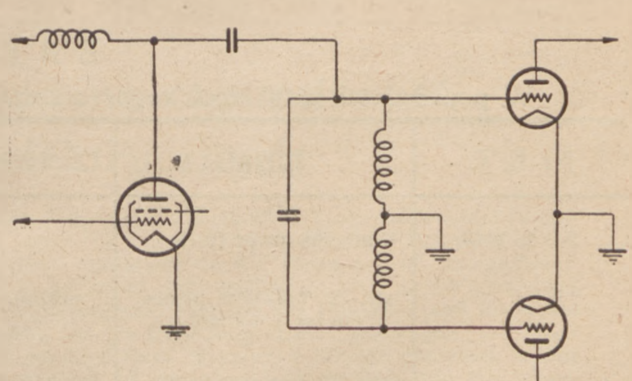
$$\left|\frac{\hat{I}_{RIII}}{\hat{I}_{RI}}\right| \simeq \frac{I_{aIII}}{I_{aI}} \cdot \frac{27}{16\,Q} \qquad 2.3$$

W rezultacie układ ten wymaga Q więcej niż 20 razy większego niż Q jakie jest potrzebe dla układu z rys. 3, by zawartość harmonicznych była ta sama. Dlatego układu neutralizacyjnego z uziemionym środkiem cewki raczej nie należy stosować.

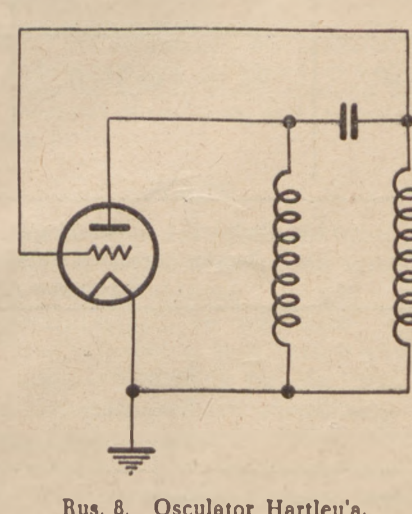
3. Zastosowanie układu π 6 przy powielaniu częstotliwości

W urządzeniach nadawczych często nie wykorzystuje się podstawowej częstotliwości oscylatora, a tylko jej wyższe harmoniczne: drugą, trzecią lub nawet czwartą. W takim wypadku należy stłumić przede wszystkim podstawową—i w tym celu najbardziej nadaje się układ π 6, jako filtr górnoprzepustowy.

W wypadku, gdy układ do powielania częstotliwości służy równocześnie jako przejście z układu niesymetrycznego na symetryczny, należy zastosować układ jak na rys. 7, czyli układ π 6 z dopasowaniem $R_o = r$.

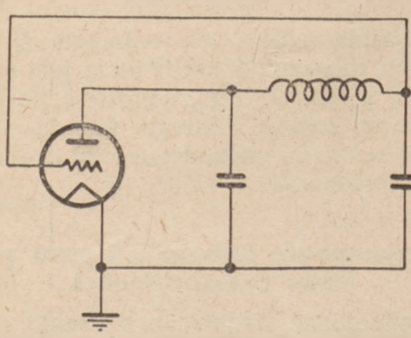


Rys. 7. Obwód rezonansowy typu π 6 w zastosowaniu do powielania częstotliwości z równoczesnym przejściem z układu niesymetrycznego na symetryczny.



Rys. 8. Oscylator Hartley'a.

Gdyby uziemiono na rys. 7 środek kondensatorów, a nie środek cewek, to otrzymanoby układ π 1, który słabo tłumi częstotliwości niższe od rezonansowej i na siatkach następnego



Rys. 9. Oscylator Colpitt'a

stopnia pojawiłaby się składowa o częstotliwości podstawowej oscylatora (niepotrzebna) o znacznej amplitudzie.

4. Porównanie oscylatorów Hartley'a i Colpitt'a

Z rys. rys. 8 i 9 widać, że w oscylatorze Hartley'a zastosowany jest układ π 6, a w oscylatorze Colpitt'a — układ π 1.

Siatka oscylatora Colpitt'a jest zasilana ze znacznie mniejszą zawartością harmonicznych niż siatka oscylatora Hartley'a (jeżeli inne warunki w obu oscylatorach są te same). Ponieważ zaś niestałość częstotliwości jest proporcjonalna do zawartości harmonicznych [1] [2], więc to tłumaczy fakt, że oscylator Colpitt'a ma większą stałość częstotliwości niż oscylator Hartley'a, jeżeli inne warunki—jak punkt pracy, współczynnik przepięcia obwodu Q itp. — są te same dla obu oscylatorów.

5. Wykaz literatury

1. J. Groszkowski. Zmiany częstotliwości, a zawartość harmonicznych w układach oscylacyjnych. Przegląd Radiotechniczny. 1932, Nr 3.
2. J. Groszkowski. The interdependence of frequency variations and harmonic content, and the problem of constant frequency oscillators. PIRE. 21.7.958. (1934).
3. A. Czechowski. Projektowanie układów wyjściowych w urządzeniach radionadawczych. Kwartalnik Telekomunikacyjny. 1948, Nr 2.
4. A. Czechowski. Wybór Q układu wyjściowego w urządzeniach radionadawczych. Kwartalnik Telekomunikacyjny. 1948, Nr 3 — 4.

ERRATA

W poprzednich artykułach togoż autora wkradły się następujące błędy drukarskie

Nr K. T.	Miejsce	Jest:	Powinno być:
2 — 3, 1948	str. 30, wzór (2—1)	$Q, \lvert X \rvert$	$Q \cdot \lvert X \rvert$
	str. 32, kolumna prawa. wiersz 1 od dołu	praktycznie ulega zmianie	praktycznie nie ulega zmianie
	str. 37, wzór (4.4.—4)	$\frac{1}{1-\frac{\lvert X_1\rvert \cdot \lvert X_3\rvert}{r \cdot R_0}} 1 - =$	$\frac{1}{1-\frac{\lvert X_1\rvert \cdot \lvert X_3\rvert}{r \cdot R_0}} - 1 =$
4, 1948	str. 48, wzór (2—1)	$\left\lvert \frac{\hat{I}_{R1}}{\hat{I}_{R1}} \right\rvert_{Q=10} \cdot \frac{10}{Q_x}$	$\left\lvert \frac{\hat{I}_{RII}}{\hat{I}_{R1}} \right\rvert_{Q=10} \cdot \frac{10}{Q_x}$

Adres Redakcji i Administracji: **Warszawa, Nowogrodzka 45, III p., telef. 871-70.**
Konto: „Przegląd Telekomunikacyjny" PKO w Warszawie Nr I-4430
Sekretariat czynny codziennie od godz. 9 do 14.

WARUNKI PRENUMERATY

Rocznie . . . . Zł. 400.—
Kwartalnie . . . . Zł. 100.—
Pojedyńczy numer . . . . Zł. 100.—

Redaktor: **Inż. Henryk Kowalski.** Wydawca: **Sekcja Telekomunikacyjna SEP**
Druk Państwowy Instytut Telekomunikacyjny — Warszawa, ul. Ratuszowa 11. B-76039